CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENGENHARIA

AVANÇOS, APLICAÇÕES E PERSPECTIVAS

HIGOR BRITO
ORGANIZADOR

AMPLLA EDITORA

CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENGENHARIA

AVANÇOS, APLICAÇÕES E PERSPECTIVAS

HIGOR BRITO
ORGANIZADOR

AMPLLA
EDITORA

2026 - Amplla Editora
Copyright © Amplla Editora
Editor Chefe: Leonardo Tavares
Design da Capa: Amplla Editora

Ciência, tecnologia e engenharia: avanços, aplicações e perspectivas está licenciado sob CC BY 4.0.

Essa licença permite que outros remixem, adaptem e desenvolvam seu trabalho para fins não comerciais e, embora os novos trabalhos devam ser creditados e não possam ser usados para fins comerciais, os usuários não precisam licenciar esses trabalhos derivados sob os mesmos termos. O conteúdo da obra e sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores e não representam a posição oficial da Amplla Editora. O download e o compartilhamento da obra são permitidos, desde que os autores sejam reconhecidos. Todos os direitos desta edição foram cedidos à Amplla Editora.

Catalogação na publicação
Elaborada por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

C569

Ciência, tecnologia e engenharia: avanços, aplicações e perspectivas / Organização de Higor Costa de Brito. – Campina Grande/PB: Amplla, 2026.

(Ciência, tecnologia e engenharia, V. 1)

Livro em PDF

ISBN 978-65-5381-387-8
DOI 10.51859/amplla.cte6378-0

1. Ciência. 2. Tecnologia. 3. Engenharia. 4. Pesquisa científica. I. Brito, Higor Costa de (Organizador). II. Título.

CDD 601

Índice para catálogo sistemático

I. Ciência

CONSELHO EDITORIAL

Adilson Tadeu Basquerote – Centro Universitário para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Alexander Josef Sá Tobias da Costa – Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Andréa Cátia Leal Badaró – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Andréia Monique Lermen – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Antoniele Silvana de Melo Souza – Universidade Estadual do Ceará
Aryane de Azevedo Pinheiro – Universidade Federal do Ceará
Bergson Rodrigo Siqueira de Melo – Universidade Estadual do Ceará
Bruna Beatriz da Rocha – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais
Bruno Ferreira – Universidade Federal da Bahia
Caio Augusto Martins Aires – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Caio César Costa Santos – Universidade Federal de Sergipe
Carina Alexandra Rondini – Universidade Estadual Paulista
Carla Caroline Alves Carvalho – Universidade Federal de Campina Grande
Carlos Augusto Trojaner – Prefeitura de Venâncio Aires
Carolina Carbonell Demori – Universidade Federal de Pelotas
Caroline Barbosa Vieira – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul
Christiano Henrique Rezende – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Cícero Batista do Nascimento Filho – Universidade Federal do Ceará
Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Dandara Scarlet Sousa Gomes Bacelar – Universidade Federal do Piauí
Daniela de Freitas Lima – Universidade Federal de Campina Grande
Darlei Gutierrez Dantas Bernardo Oliveira – Universidade Estadual da Paraíba
Denilson Paulo Souza dos Santos – Universidade Estadual Paulista
Denise Barguil Nepomuceno – Universidade Federal de Minas Gerais
Dinara das Graças Carvalho Costa – Universidade Estadual da Paraíba
Diogo Lopes de Oliveira – Universidade Federal de Campina Grande
Dylan Ávila Alves – Instituto Federal Goiano
Edson Lourenço da Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
Elane da Silva Barbosa – Universidade Estadual do Ceará
Érica Rios de Carvalho – Universidade Católica do Salvador
Fábio Ronaldo da Silva – Universidade do Estado da Bahia
Fernanda Beatriz Pereira Cavalcanti – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Fredson Pereira da Silva – Universidade Estadual do Ceará
Gabriel Gomes de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas
Gilberto de Melo Junior – Instituto Federal do Pará
Givanildo de Oliveira Santos – Instituto Brasileiro de Educação e Cultura
Glécia Morgana da Silva Marinho – Pontifícia Universidad Católica Argentina Santa Maria de Buenos Aires (UCA)
Higor Costa de Brito – Universidade Federal de Campina Grande
Hugo José Coelho Corrêa de Azevedo – Fundação Oswaldo Cruz
Igor Lima Soares – Universidade Federal do Ceará
Isabel Fontgalland – Universidade Federal de Campina Grande
Isane Vera Karsburg – Universidade do Estado de Mato Grosso
Israel Gondres Torné – Universidade do Estado do Amazonas
Ivo Batista Conde – Universidade Estadual do Ceará
Jaqueline Rocha Borges dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Jessica Wanderley Souza do Nascimento – Instituto de Especialização do Amazonas
João Henriques de Sousa Júnior – Universidade Federal de Santa Catarina
João Manoel Da Silva – Universidade Federal de Alagoas
João Vitor Andrade – Universidade de São Paulo
Joilson Silva de Sousa – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
José Cândido Rodrigues Neto – Universidade Estadual da Paraíba
Jose Henrique de Lacerda Furtado – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Josenita Luiz da Silva – Faculdade Frassinetti do Recife
Josiney Farias de Araújo – Universidade Federal do Pará
Karina de Araújo Dias – SME/Prefeitura Municipal de Florianópolis
Katia Fernanda Alves Moreira – Universidade Federal de Rondônia
Laís Portugal Rios da Costa Pereira – Universidade Federal de São Carlos
Laíze Lantyer Luz – Universidade Católica do Salvador
Lara Luiza Oliveira Amaral – Universidade Estadual de Campinas
Lindon Johnson Pontes Portela – Universidade Federal do Oeste do Pará
Lisiane Silva das Neves – Universidade Federal do Rio Grande
Lucas Araújo Ferreira – Universidade Federal do Pará
Lucas Capita Quarto – Universidade Federal do Oeste do Pará
Lúcia Magnólia Albuquerque Soares de Camargo – Unifacisa Centro Universitário
Luciana de Jesus Botelho Sodré dos Santos – Universidade Estadual do Maranhão
Luís Miguel Silva Vieira – Universidade da Madeira
Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Luiza Catarina Sobreira de Souza – Faculdade de Ciências Humanas do Sertão Central
Manoel Mariano Neto da Silva – Universidade Federal de Campina Grande
Marcelo Alves Pereira Eufrasio – Centro Universitário Unifacisa
Marcelo Henrique Torres de Medeiros – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Marcelo Williams Oliveira de Souza – Universidade Federal do Pará
Marcos Pereira dos Santos – Faculdade Rachel de Queiroz
Marcus Vinicius Peralva Santos – Universidade Federal da Bahia
Maria Carolina da Silva Costa – Universidade Federal do Piauí
Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas
Marina Magalhães de Morais – Universidade Federal do Amazonas
Mário Cézar de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia
Michele Antunes – Universidade Feevale
Michele Aparecida Cerqueira Rodrigues – Logos University International
Miguel Ysrrael Ramírez-Sánchez – Universidade Autônoma do Estado do México
Milena Roberta Freire da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
Nadja Maria Mourão – Universidade do Estado de Minas Gerais
Natan Galves Santana – Universidade Paranaense
Nathalia Bezerra da Silva Ferreira – Universidade do Estado do Rio Grande do Norte
Neide Kazue Sakugawa Shinohara – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Neudson Johnson Martinho – Faculdade de Medicina da Universidade Federal de Mato Grosso
Patrícia Appelt – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Paula Milena Melo Casais – Universidade Federal da Bahia
Paulo Henrique Matos de Jesus – Universidade Federal do Maranhão
Rafael Rodrigues Gomides – Faculdade de Quatro Marcos
Ramôn da Silva Santos – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Reângela Cíntia Rodrigues de Oliveira Lima – Universidade Federal do Ceará
Rebeca Freitas Ivanicska – Universidade Federal de Lavras
Regina Márcia Soares Cavalcante – Universidade Federal do Piauí
Renan Gustavo Pacheco Soares – Autarquia do Ensino Superior de Garanhuns
Renan Monteiro do Nascimento – Universidade de Brasília
Ricardo Leoni Gonçalves Bastos – Universidade Federal do Ceará
Rodrigo da Rosa Pereira – Universidade Federal do Rio Grande
Rubia Katia Azevedo Montenegro – Universidade Estadual Vale do Acaraú
Sabrynna Brito Oliveira – Universidade Federal de Minas Gerais
Samuel Miranda Mattos – Universidade Estadual do Ceará
Selma Maria da Silva Andrade – Universidade Norte do Paraná
Shirley Santos Nascimento – Universidade Estadual Do Sudoeste Da Bahia
Silvana Carloto Andres – Universidade Federal de Santa Maria
Silvio de Almeida Junior – Universidade de Franca
Tatiana Paschoalette R. Bachur – Universidade Estadual do Ceará | Centro Universitário Christus
Telma Regina Stroparo – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Thayla Amorim Santino – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Thiago Sebastião Reis Contarato – Universidade Federal do Rio de Janeiro
Tiago Silveira Machado – Universidade de Pernambuco
Valvenarg Pereira da Silva – Universidade do Estado de Mato Grosso
Vinícius Queiroz Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia
Virgínia Maia de Araújo Oliveira – Instituto Federal da Paraíba
Virginia Tomaz Machado – Faculdade Santa Maria de Cajazeiras
Walmir Fernandes Pereira – Miami University of Science and Technology
Wanessa Dunga de Assis – Universidade Federal de Campina Grande
Wellington Alves Silva – Universidade Estadual de Roraima
William Roslindo Paranhos – Universidade Federal de Santa Catarina
Yáscara Maia Araújo de Brito – Universidade Federal de Campina Grande
Yasmin da Silva Santos – Fundação Oswaldo Cruz
Yuciara Barbosa Costa Ferreira – Universidade Federal de Campina Grande

PREFÁCIO

A produção científica contemporânea caracteriza-se pela crescente integração entre diferentes áreas do conhecimento, impulsionada pela necessidade de compreender fenômenos complexos e desenvolver soluções para desafios tecnológicos, ambientais e sociais. Nesse contexto, a presente obra reúne contribuições que refletem essa diversidade, evidenciando o potencial da ciência e da tecnologia na construção de conhecimentos e no aprimoramento de processos em diferentes setores da sociedade.

No campo das engenharias e das tecnologias digitais, os estudos abordam avanços relacionados à modelagem matemática, à simulação computacional, à robótica e à aplicação da inteligência artificial em sistemas de apoio à decisão. Também são exploradas soluções tecnológicas voltadas à avaliação e à conservação de edificações, à durabilidade de estruturas e ao desenvolvimento de alternativas para a manutenção de infraestruturas.

A sustentabilidade ambiental constitui outro eixo da obra, contemplando investigações sobre gerenciamento de resíduos sólidos, tecnologias para mitigação da poluição aquática, aproveitamento de subprodutos agroindustriais e uso eficiente dos recursos naturais. Nesse conjunto, destacam-se discussões sobre gestão hídrica, planejamento sustentável de propriedades rurais, aproveitamento da energia solar e valorização de resíduos por meio de alternativas associadas à economia circular.

A diversidade temática também se expressa em pesquisas que relacionam ciência, tecnologia e sociedade, abrangendo a análise de dados aplicados ao setor agrícola, as transformações da mobilidade mediada por plataformas digitais e os avanços da nanotecnologia em aplicações farmacêuticas. Paralelamente, as reflexões sobre educação científica e aprendizagem em espaços não formais ressaltam a importância da disseminação do conhecimento, da formação crítica e da aproximação entre ciência e sociedade.

Ao reunir diferentes perspectivas metodológicas e campos de aplicação, esta coletânea evidencia que o avanço científico envolve também a compreensão de seus impactos, limitações e possibilidades de utilização. A articulação entre estudos teóricos, análises experimentais, modelagens e experiências aplicadas contribui para ampliar o debate acadêmico e estimular novas investigações.

Higor Costa de Brito
Engenheiro Civil
Mestre em Engenharia Civil e Ambiental
Doutor em Engenharia Civil e Ambiental

SUMÁRIO

CAPÍTULO I. DA RECOMENDAÇÃO À AÇÃO: DECISÃO MULTICRITÉRIO E GOVERNANÇA ADAPTATIVA NA FRONTEIRA DA IA AGÊNTICA 9

CAPÍTULO II. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA CINEMÁTICA, PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA E DINÂMICA DE UM MANIPULADOR PRP BASEADO NO ROBÔ COMERCIAL PLATECRANE EX (HUDSON ROBOTICS)..27

CAPÍTULO III. MODELAGEM E ANÁLISE DE CIRCUITO RLC CHAVEADO, SOLUÇÃO POR MEIO DA TRANSFORMADA DE LAPLACE E VALIDAÇÃO VIA COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ANALÍTICOS E COMPUTACIONAIS..... 60

CAPÍTULO IV. DESENVOLVIMENTO DE UMA APLICAÇÃO WEB PARA A IDENTIFICAÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM EDIFICAÇÕES COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL 74

CAPÍTULO V. O IMPACTO DA FALTA DE MANUTENÇÃO PREDIAL NA CONSERVAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES: ESTUDO DE CASO 88

CAPÍTULO VI. ELABORAÇÃO DE PLANO DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS À LUZ DA LEGISLAÇÃO AMBIENTAL VIGENTE: ESTUDO DE CASO EM EMPRESA DE RETÍFICA 116

CAPÍTULO VII. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS CONJUNTOS HABITACIONAIS DE INTERESSE SOCIAL NA CIDADE DO RECIFE-PE: DEGRADAÇÃO E SEUS IMPACTOS NA HABITABILIDADE..... 132

CAPÍTULO VIII. ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO ECONÔMICA COM RESÍDUOS DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS UTILIZANDO TECNOLOGIA DE POLÍMEROS 151

CAPÍTULO IX. CARONAS PAGAS:REVISITANDO REFLEXÕES EXPLORATÓRIAS SOBRE MOBILIDADE COMPARTILHADA, MEDIAÇÃO ALGORÍTMICA E INTERAÇÕES SOCIAIS NA ROTA PELOTAS–PORTO ALEGRE 165

CAPÍTULO X. AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE DIFERENTES FONTES DE DADOS DE COBERTURA DE NUVENS PARA A MODELAGEM DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO BRASILEIRO 180

CAPÍTULO XI. SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E A PEGADA HÍDRICA TOTAL: UM ESTUDO DOS NÍVEIS DE ESCASSEZ, DA APROPRIAÇÃO DA ÁGUA E DA POLUIÇÃO NA SUB-BACIA DO RIO MIRIRI LOCALIZADA NO ESTADO DA PARAÍBA..... 197

CAPÍTULO XII. DA LAMA AO CAOS, DO CAOS À SOLUÇÃO: TECNOLOGIA NO ENFRENTAMENTO DOS RESÍDUOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS 215

CAPÍTULO XIII. MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO SUSTENTÁVEL DE PEQUENAS PROPRIEDADES RURAIS NO SEMIÁRIDO NORDESTINO.....230

CAPÍTULO XIV. PADRÕES TEMPORAIS E HETEROGENEIDADE ENTRE FONTES NOS PREÇOS DE MILHO E TRIGO NO PARANÁ: UMA ABORDAGEM DE MINERAÇÃO DE DADOS..... 248

CAPÍTULO XV. VALORIZAÇÃO DO BAGAÇO DE UVA: COMPOSIÇÃO CENTESIMAL E RESPOSTA ANTIOXIDANTE DE EXTRATOS DE DIFERENTES VARIEDADES.....264

CAPÍTULO XVI. DO BAGAÇO À FARINHA: COMPOSIÇÃO E RESPOSTAS ANTIOXIDANTES DE QUATRO VARIEDADES DE UVA.....276

CAPÍTULO XVII. NANOCAREADORES FARMACÊUTICOS: DEVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA E A ASSOCIAÇÃO TEMÁTICA COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, SÍNTESE VERDE, NANOTOXICIDADE, MEDICINA PERSONALIZADA E ESCALONAMENTO..... 288

CAPÍTULO XVIII. EDUCAÇÃO CIENTÍFICA NÃO FORMAL E ANIMAÇÃO SOCIOEDUCATIVA: APRENDIZAGEM EXPERIENCIAL ATRAVÉS DE ESTÁGIOS CURRICULARES EM CENTROS DE CIÊNCIA.....303

CAPÍTULO I

DA RECOMENDAÇÃO À AÇÃO: DECISÃO MULTICRITÉRIO E GOVERNANÇA ADAPTATIVA NA FRONTEIRA DA IA AGÊNTICA

FROM RECOMMENDATION TO ACTION: MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING AND ADAPTIVE GOVERNANCE AT THE FRONTIER OF AGENTIC AI

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-1

Rosivaldo Cardoso Santiago [1]
José Orbílio de Souza Abreu [2]

[1] Doutor em Gestão e Tecnologia Industrial pela Universidade SENAI CIMATEC. Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz).
[2] Doutor em Gestão e Tecnologia Industrial. Universidade SENAI CIMATEC. Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz)

RESUMO

A rápida evolução de modelos fundacionais e sistemas agênticos deslocou o problema do apoio à decisão de uma questão predominantemente preditiva para uma questão de governança da ação sob incerteza. Este capítulo discute, por meio de revisão crítica narrativa e conceitual que incorpora desenvolvimentos recentes de 2026, como integrar análise de decisão multicritério (MCDA), modelos fundacionais, quantificação de incerteza, explicabilidade e capacidades agênticas sem converter capacidade técnica em autoridade automática. A literatura recente e evidências institucionais mostram que o desafio já não é apenas explicar previsões: sistemas capazes de planejar, usar ferramentas e agir exigem identidade, autorização, proveniência, monitoramento de trajetória, contestabilidade e reversibilidade. Como contribuição, propõe-se uma arquitetura de seis camadas atravessada por um plano de governança adaptativa e de qualidade da evidência. O framework articula estruturação sociotécnica, inteligência baseada em dados, incerteza e robustez, decisão multicritério/prescritiva, explicação/contestabilidade e governança humano-agente. Sustenta-se que sistemas de apoio à decisão de alto impacto devem ser avaliados simultaneamente por desempenho, calibração, robustez do ranking, fidelidade das explicações, segurança operacional e capacidade institucional de interromper ou reverter ações.

Palavras-chave: Decisão multicritério. Inteligência artificial agêntica. Inteligência artificial explicável. Incerteza. Governança algorítmica.

ABSTRACT

The rapid evolution of foundation models and agentic systems has shifted decision support from a predominantly predictive problem to one of governing action under uncertainty. This chapter provides a critical narrative and conceptual review incorporating recent 2026 developments, examining how multi-criteria decision analysis (MCDA), foundation models, uncertainty quantification, explainability and agentic capabilities can be integrated without turning technical capability into automatic authority. Recent literature and institutional evidence indicate that the challenge is no longer limited to explaining predictions: systems able to plan, use tools and act require identity, authorization, provenance, trajectory monitoring, contestability and reversibility. The chapter proposes a six-layer architecture crossed by an adaptive governance and evidence-quality plane. It integrates sociotechnical problem structuring, data/model intelligence, uncertainty and robustness, multi-criteria/prescriptive decision, explanation/contestability and human-agent governance. High-impact decision support systems should therefore be assessed jointly by predictive performance, calibration, ranking robustness, explanation fidelity, operational security and the institutional ability to stop or reverse actions.

Keywords: Multi-criteria decision analysis. Agentic AI. Explainable artificial intelligence. Uncertainty. Algorithmic governance.

1. INTRODUÇÃO

A tomada de decisão estratégica em engenharia e tecnologia raramente se resolve pela maximização de um único indicador. Selecionar fornecedores críticos, priorizar projetos de pesquisa e desenvolvimento, compor portfólios tecnológicos ou definir investimentos em infraestrutura exige compatibilizar critérios econômicos, técnicos, operacionais, ambientais e regulatórios, frequentemente conflitantes. A análise de decisão multicritério (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) se consolidou precisamente para estruturar esse tipo de problema, por meio de famílias como AHP, TOPSIS, ELECTRE e PROMETHEE, nas quais critérios, preferências e regras de agregação podem ser explicitados e submetidos a análise de sensibilidade (HWANG; YOON, 1981; ROY, 1996; SAATY, 1980).

A transformação recente altera a escala e a natureza do problema. Sistemas de aprendizado de máquina estimam desempenhos e reconhecem padrões; LLMs processam documentos e operam fluxos de trabalho longos; agentes passam a selecionar ferramentas, executar código e interagir com serviços externos. Em agosto de 2026, a própria trajetória do Astra, da OpenAI, tornou visível a dualidade dessa fronteira: a empresa divulgou resultados matemáticos e de ciência da computação obtidos por uma versão interna do modelo e, poucos dias depois, informou que avaliações cibernéticas não permitiam descartar capacidades classificadas como críticas em seu Preparedness Framework, levando à suspensão de atividades internas que não atendessem a controles reforçados (OPENAI, 2026c; 2026d). Como ambas as evidências provêm do desenvolvedor, elas devem ser tratadas como fontes primárias institucionais, não como validação científica independente.

Esse avanço torna insuficiente a oposição simples entre MCDA transparente e aprendizado de máquina opaco. O problema contemporâneo combina incerteza de dados e de modelo, preferências incompletas, explicações potencialmente instáveis, mudança de distribuição, riscos cibernéticos, dependências de infraestrutura e autonomia operacional. Soma-se um problema epistemológico: em tecnologias de fronteira, decisões podem ser alimentadas por evidências desatualizadas, promocionais ou cronologicamente mal contextualizadas. A proveniência, a data de validade e o grau de confirmação da evidência tornam-se, portanto, requisitos do próprio sistema decisório, e não apenas da redação científica.

A XAI continua relevante, mas sua fronteira se deslocou. SHAP e LIME permanecem instrumentos úteis de atribuição e aproximação local, porém uma explicação plausível não demonstra que a predição esteja correta, que o ranking seja robusto ou que a ação recomendada deva ser executada. Trabalhos de 2026 avançam em três direções complementares: explicações conscientes da incerteza, personalização das explicações segundo preferências do usuário e explicabilidade da própria prescrição/otimização, isto é, da pergunta “por que esta ação deve ser feita?” e não apenas “por que esta previsão ocorreu?” (LÖFSTRÖM et al., 2026; GRECO et al., 2026; AYDIN et al., 2026).

A pergunta de pesquisa que orienta este capítulo é: como organizar uma arquitetura multicritério de apoio à decisão que incorpore aprendizado de máquina, modelos fundacionais e capacidades agênticas, quantifique incertezas relevantes e preserve controle sobre evidência, autoridade, segurança e reversibilidade? O objetivo é propor uma perspectiva integradora em que MCDA funcione como núcleo explícito de preferências e trade-offs, enquanto módulos de IA ampliam capacidade analítica sem eliminar controles institucionais.

A contribuição pretendida não é a criação de um algoritmo universal, mas a integração de elementos ainda fragmentados na literatura: estruturação sociotécnica; inteligência baseada em dados e modelos fundacionais; incerteza e robustez; decisão multicritério/prescritiva; explicação e contestabilidade; e governança humano-agente. O plano transversal acrescenta controles de identidade, autorização, proveniência, qualidade da evidência, monitoramento de trajetória, resposta a incidentes e rollback. Essa combinação procura responder à passagem, já observável em 2026, de sistemas que apenas recomendam para sistemas que também podem agir.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. DELIMITAÇÃO DA REVISÃO E CRITÉRIO DE ATUALIZAÇÃO

O capítulo adota revisão crítica de caráter narrativo e conceitual, orientada pela pergunta de pesquisa e atualizada com os desenvolvimentos mais recentes de 2026. O recorte privilegia estudos de 2023–2026 sobre MCDM/MCDA, aprendizado de máquina, XAI, quantificação de incerteza, modelos fundacionais, sistemas agênticos e governança técnica. Obras clássicas são mantidas apenas quando indispensáveis aos fundamentos. Para eventos muito recentes, priorizam-se artigos revisados por pares, documentos regulatórios e fontes

institucionais primárias; preprints e relatos corporativos são utilizados apenas quando sua condição é explicitada.

Foi adotado ainda um critério de confiabilidade para acontecimentos de 2026. Alegações provenientes apenas de agregadores, rankings comerciais, anúncios promocionais ou rumores foram excluídas do argumento central até confirmação em fonte primária ou literatura técnica. Também se verificaram datas, escopo regulatório e estágio de validação para evitar um erro recorrente em pesquisa de fronteira: fatos tecnicamente reais podem ser deslocados no tempo ou apresentados como mais maduros do que efetivamente são. Esse procedimento de triagem é particularmente importante para sistemas de decisão que automatizam coleta e síntese de evidências.

2.2. DO MCDM CLÁSSICO À HIBRIDIZAÇÃO ORIENTADA POR DADOS

A contribuição histórica do MCDA foi separar a estrutura do problema de uma simples previsão estatística. No AHP, julgamentos paritários organizam prioridades; em TOPSIS, alternativas são posicionadas em relação a soluções ideais; nos métodos ELECTRE e PROMETHEE, relações de preferência e sobreclassificação permitem representar situações em que compensações integrais entre critérios não são desejáveis. Em todos os casos, o método escolhido incorpora pressupostos normativos que precisam ser explicitados, pois normalização, pesos, limiares e regras de compensação podem modificar o ranking final.

A hibridização com aprendizado de máquina expandiu-se porque parte das entradas do MCDA pode ser estimada a partir de dados. Revisões recentes documentam classificação, agrupamento, redução de dimensionalidade e previsão combinados a métodos multicritério (ALI et al., 2023; KUMAR; PAMUCAR, 2025). O ganho, porém, não elimina a diferença entre inferência empírica e escolha normativa: estimar desempenho é distinto de decidir quais objetivos, riscos e compensações são aceitáveis.

Essa constatação exige distinguir dois tipos de informação. Dados históricos podem informar probabilidades, estimativas de desempenho ou correlações entre atributos; já objetivos, critérios de aceitabilidade, aversão ao risco e limites de compensação expressam valores e responsabilidades organizacionais. Um modelo pode aprender que determinado critério prediz resultados passados, mas não pode, por inferência estatística apenas, estabelecer que esse critério deve receber legitimamente maior peso em uma decisão

estratégica. A arquitetura proposta neste capítulo preserva essa separação entre inferência e preferência como princípio de desenho.

2.3. DA OPACIDADE À INCERTEZA: LIMITES DA XAI PÓS-HOC

A primeira geração de XAI concentrou-se em tornar previsões de modelos complexos mais inteligíveis. O LIME aproxima localmente o classificador por um modelo interpretável; o SHAP calcula contribuições aditivas inspiradas nos valores de Shapley (RIBEIRO; SINGH; GUESTRIN, 2016; LUNDBERG; LEE, 2017). Essas técnicas permanecem úteis, mas a maturidade científica do campo exige reconhecer seus limites: uma explicação pode ser visualmente plausível e, ainda assim, instável diante de pequenas perturbações, pouco fiel ao modelo, inadequada ao usuário ou incapaz de revelar que a própria predição está associada a elevada incerteza.

A literatura de 2026 explicita esse deslocamento. Löfström et al. (2026), em revisão sistemática sobre Uncertainty-Aware XAI, identificam abordagens bayesianas, Monte Carlo e conformais para incorporar incerteza aos pipelines explicativos. O ponto conceitual é decisivo para sistemas de apoio à decisão: não basta indicar quais variáveis contribuíram para uma recomendação; é necessário informar quão confiáveis são a predição e a explicação, quais propriedades foram calibradas e em que condições os resultados podem falhar.

Em paralelo, Greco et al. (2026) propõem uma perspectiva baseada em preferências, na qual explicações concorrentes são avaliadas segundo critérios do usuário e as preferências podem ser aprendidas por regressão ordinal robusta. Em outra frente, Aydın et al. (2026) defendem a Explainable Optimization (XOpt): se a previsão responde ao que pode acontecer, a prescrição responde ao que deve ser feito, exigindo justificativas sobre restrições, alternativas rejeitadas e trade-offs. Para MCDA, essa passagem é decisiva, porque a explicabilidade deixa de se limitar ao modelo preditivo e passa a alcançar o próprio ato de recomendar.

2.4. QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZA E PREDIÇÃO CONFORMAL COMO CAMADA DECISÓRIA

A expressão “decisão sob incerteza” precisa ser operacionalizada. Em uma arquitetura híbrida, pelo menos quatro fontes devem ser separadas: incerteza dos dados, associada a ruído, lacunas e mudança de distribuição; incerteza do modelo, relacionada à generalização; incerteza das preferências, decorrente de pesos, limiares ou julgamentos imprecisos; e

incerteza da explicação, ligada à variabilidade ou à baixa fidelidade do método explicador. A robustez final do ranking depende de como essas fontes se propagam pela cadeia decisória.

A predição conformal ganhou destaque por produzir conjuntos ou intervalos preditivos com garantias de cobertura em amostras finitas sob hipóteses apropriadas, especialmente intercambialidade. Angelopoulos e Bates (2023) sistematizam esse paradigma, que é agnóstico ao modelo preditivo. Para MCDA, o valor não está em substituir preferências por probabilidades, mas em permitir que desempenhos previstos entrem na matriz de decisão acompanhados de informação calibrada sobre sua incerteza.

A fronteira mais recente aproxima a quantificação de incerteza da própria função decisória. Trabalhos de decision-focused uncertainty quantification mostram que conjuntos de predição podem ser construídos considerando a perda ou utilidade downstream, enquanto estudos de 2026 investigam decisões robustas e avessas ao risco baseadas em conjuntos preditivos (CORTES-GOMEZ et al., 2024; WANG et al., 2026). A consequência para portfólios tecnológicos é prática: uma alternativa que ocupa o primeiro lugar sob estimativas pontuais pode deixar de ser preferível quando se consideram intervalos calibrados, cenários adversos ou aversão ao risco.

Essa camada também deve prever abstenção. Em vez de forçar uma recomendação quando a evidência é fraca, o sistema pode sinalizar que a incerteza excede um limiar de decisão e encaminhar o caso para revisão humana. A abstenção não representa falha do sistema, mas um mecanismo de segurança compatível com decisões de alto impacto, sobretudo quando a assimetria de custos torna um falso senso de precisão mais perigoso do que a ausência de recomendação.

2.5. LLMS E MODELOS FUNDACIONAIS: INTERFACE COGNITIVA, NÃO ÁRBITRO NORMATIVO

Em 2026, LLMs e modelos fundacionais passaram a ocupar posição mais relevante em sistemas de apoio à decisão por processarem linguagem natural, sintetizarem evidências e operarem em fluxos de trabalho longos. Shekhovtsov, Oskooei e Sałabun (2026) discutem sua integração com MCDA para preservar estrutura formal em decisões assistidas por modelos de linguagem. A divulgação dos dez resultados do Astra em matemática e ciência da computação teórica amplia o horizonte de uso: além de resumir conhecimento existente, modelos de fronteira podem participar da geração de resultados candidatos a conhecimento novo. Isso aumenta o valor potencial desses sistemas, mas eleva a exigência de verificação

independente, rastreabilidade e separação entre descoberta proposta e resultado validado (OPENAI, 2026c).

LLMs podem apoiar a identificação de candidatos a critérios, mapear argumentos de stakeholders, extrair evidências de documentos técnicos e explicar resultados em linguagem adaptada ao público. Contudo, essas funções exigem proveniência. Qualquer critério sugerido ou evidência recuperada deve ser rastreável à fonte, e saídas generativas não devem ser tratadas como dados observados apenas por apresentarem redação plausível. Em sistemas estratégicos, uma arquitetura baseada em RAG ou em ferramentas externas precisa registrar documentos consultados, versões, consultas e transformações realizadas.

Essa distinção também evita um erro recorrente: usar LLMs para inferir preferências normativas em nome do decisor. O modelo pode facilitar a elicitação e identificar inconsistências, mas a aceitação de trade-offs estratégicos permanece responsabilidade dos atores legitimados — o fundacional atua como camada cognitiva de interface, submetida a controles formais, não como decisor.

2.6. AGENTIC AI: DA RECOMENDAÇÃO À AÇÃO E O PROBLEMA DA AUTORIDADE

O avanço de agentic AI altera qualitativamente o desenho dos sistemas de apoio à decisão. Agentes podem decompor objetivos, selecionar ferramentas, consultar serviços externos, escrever ou executar código, replanejar e persistir por longos horizontes. O International AI Safety Report 2026 observa que a autonomia reduz oportunidades de intervenção humana antes que falhas causem dano e amplia riscos de mau funcionamento, manipulação e uso malicioso (BENGIO et al., 2026). O problema de decisão deixa, assim, de ser apenas 'qual alternativa recomendar?' e passa a incluir 'quais ações o sistema está autorizado a realizar, em que condições e com quais mecanismos de contenção?'.

Quando o sistema pode agir, explicabilidade deixa de ser suficiente. Contestabilidade exige que pessoas autorizadas possam revisar, interromper, corrigir ou reverter decisões e ações, preservando responsabilidade institucional (NGUYEN et al., 2026). Segurança também não pode ser inferida da simples acumulação de filtros. O ataque STACK mostrou 71% de sucesso contra um pipeline de salvaguardas em ClearHarm após adaptação adversarial, evidenciando que "defesa em profundidade" precisa combinar controles de autoridade, isolamento, credenciais e monitoramento (MCKENZIE et al., 2026).

Outra contribuição emergente é separar capacidade de permissão. Zheng et al. (2026) distinguem níveis de capacidade autônoma dos níveis de autonomia efetivamente autorizados. Essa distinção converge com o NIST (2026a; 2026b), que trata identidade e autorização de agentes como problemas específicos de infraestrutura. Um agente pode ser tecnicamente capaz de executar uma tarefa e, ainda assim, ter de operar com escopo reduzido, menor privilégio, credenciais efêmeras ou aprovação humana.

A supervisão deve, portanto, ser graduada pelo risco, pela irreversibilidade e pela criticidade do ativo afetado. Tarefas de baixo impacto podem operar com automação monitorada; ações com efeitos financeiros, operacionais, regulatórios ou cibernéticos relevantes podem exigir autorização humana, limites transacionais e capacidade de rollback. A3, da Anthropic, ilustra uma oportunidade complementar: agentes também podem automatizar parte da mitigação de falhas de segurança, mas sua própria eficácia deve ser auditada e não elimina a necessidade de supervisão independente (ANTHROPIC, 2026a).

2.7. GOVERNANÇA ADAPTATIVA: IDENTIDADE, AUTORIDADE, TRAJETÓRIA E REGULAÇÃO

O ambiente regulatório de agosto de 2026 confirma que governança precisa ser tratada como requisito de engenharia. Na União Europeia, as obrigações de transparência do artigo 50 do AI Act tornaram-se aplicáveis em 2 de agosto de 2026, enquanto as regras para sistemas de alto risco do Anexo III foram postergadas para 2 de dezembro de 2027 e, para sistemas incorporados a produtos regulados do Anexo I, para 2 de agosto de 2028 (COMISSÃO EUROPEIA, 2026a; 2026c). A distinção é substantiva: transparência já é exigência presente, mas parte importante das obrigações de alto risco permanece em transição.

Transparência regulatória, contudo, não equivale a segurança operacional. O NIST lançou em fevereiro de 2026 a AI Agent Standards Initiative, enfatizando interoperabilidade, segurança, identidade e autorização de agentes capazes de agir autonomamente (NIST, 2026a; 2026b). A OpenAI, por sua vez, anunciou em 7 de agosto controles reforçados para o Astra — isolamento, restrição de acesso a redes e ferramentas, criptografia de pesos e monitoramento adicional — e suspendeu atividades internas que ainda não atendessem a esses requisitos, após não conseguir excluir a possibilidade de capacidade cibernética crítica (OPENAI, 2026d). O caso é institucional, não evidência independente, mas ilustra por que governança precisa acompanhar a fronteira de capacidade em tempo quase real.

No Brasil, a governança encontra-se em construção institucional. O PL 2338/2023 permanece em tramitação na Câmara dos Deputados, enquanto proposta do Executivo de dezembro de 2025 busca criar o Sistema Nacional para Desenvolvimento, Regulação e Governança de Inteligência Artificial (SIA) e sanar questões de iniciativa legislativa relacionadas às competências da ANPD. Paralelamente, a ANPD incluiu inteligência artificial e tecnologias emergentes entre os quatro temas prioritários de fiscalização para 2026–2027 (BRASIL, 2025; CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2026; ANPD, 2025). Para organizações brasileiras, isso recomenda governança por princípios de risco e evidência desde já, em vez de aguardar a estabilização completa do marco legal.

2.8. AMEAÇAS E OPORTUNIDADES: DO APOIO À DECISÃO À GOVERNANÇA DA AÇÃO

As oportunidades mais relevantes decorrem da combinação entre capacidade analítica e estrutura decisória. LLMs podem reduzir o custo de estruturar evidências e explorar cenários; quantificação de incerteza pode sustentar abstenção e escalonamento humano; MCDA pode tornar preferências e limites de compensação auditáveis; agentes podem automatizar etapas reversíveis e de baixo risco. A mesma infraestrutura pode apoiar auditoria automatizada: AuditBench e A3 indicam uma linha de pesquisa na qual agentes são usados para investigar comportamentos ocultos e mitigar falhas, embora os resultados ainda não substituam validação independente (ANTHROPIC, 2026a; 2026b).

As ameaças também mudam de natureza. Aos riscos clássicos de viés, drift e opacidade somam-se injeção ou envenenamento de contexto, uso indevido de ferramentas, abuso de credenciais, propagação de erro entre agentes, concentração em poucos provedores e ações não autorizadas. Há ainda risco epistemológico: um agente pode executar corretamente um plano baseado em evidência incorreta, desatualizada ou promocional. Por isso, controles de proveniência, validade temporal, confirmação cruzada e nível de confiança da fonte devem integrar o pipeline, especialmente quando a decisão incorpora notícias, documentos regulatórios ou resultados científicos ainda não consolidados.

A consequência para a governança é uma mudança de objetivo: sistemas confiáveis não devem maximizar confiança subjetiva, mas calibrar dependência e autoridade. Uma explicação deve ajudar o usuário a detectar erros, reconhecer incerteza e contestar a recomendação; um log deve permitir reconstruir a trajetória; um controle de permissão deve impedir que competência vire autorização por padrão; e a evidência usada deve ser rastreável

até sua fonte e data. Segurança, explicabilidade e qualidade da evidência passam, assim, a ser dimensões complementares de uma mesma arquitetura de decisão.

2.9. ARQUITETURA INTEGRADORA: SEIS CAMADAS E UM PLANO TRANSVERSAL DE CONTROLE

A síntese da literatura permite propor uma arquitetura de seis camadas funcionais, apresentada na Figura 1. A primeira estrutura o problema sociotécnico, definindo objetivos, critérios, stakeholders, restrições e limites de automação. A segunda concentra inteligência baseada em dados, incluindo ML, LLMs, recuperação de conhecimento e modelos fundacionais. A terceira representa incerteza e robustez, com calibração, predição conformal quando apropriada, detecção de mudança de distribuição, cenários e sensibilidade. A quarta executa a decisão multicritério e, quando necessário, a prescrição/otimização. A quinta produz explicações, contrafactuais e mecanismos de contestação. A sexta governa a relação humano-agente, definindo quem autoriza, intervém, interrompe, reverte e audita.

Essas seis camadas são atravessadas por um plano de controle e governança adaptativa. Esse plano registra identidade do agente e do usuário, permissões, origem e validade temporal das evidências, versões de modelos, chamadas a ferramentas, decisões intermediárias, aprovações humanas e incidentes. Também define limites de gasto e execução, condições de abstenção, regras de escalonamento, monitoramento de trajetória e mecanismos de pausa/rollback. A governança não aparece, portanto, como relatório posterior: ela restringe e documenta o espaço de ação durante o próprio processo decisório.

O elemento distintivo não é o número de componentes, mas a integração entre desempenho, incerteza, qualidade da evidência, explicabilidade e controle operacional. Um sistema pode ter alta acurácia e baixa robustez do ranking; cobertura preditiva adequada e evidência desatualizada; explicações convincentes e permissões excessivas. A validação precisa ocorrer em mais de uma dimensão e com critérios proporcionais ao impacto da decisão.

Figura 1 – Arquitetura multicritério para decisão sob IA agêntica com plano transversal de governança adaptativa

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), a partir da síntese de Löfström et al. (2026), NIST (2026a; 2026b), Bengio et al. (2026), Zheng et al. (2026) e OpenAI (2026d).

Em um portfólio tecnológico, a arquitetura pode combinar LLMs para extrair evidências de relatórios técnicos, modelos preditivos para estimar custo, prazo, adoção ou risco, e MCDA para explicitar prioridades estratégicas. A camada de incerteza indicaria quando diferenças entre alternativas são robustas ou sensíveis a dados e pesos. Se um agente fosse autorizado a solicitar cotações, atualizar bases ou executar rotinas, o plano de controle limitaria credenciais, ferramentas, orçamento e horizonte de ação, registrando checkpoints e exigindo aprovação humana antes de compromissos irreversíveis. Assim, a IA passa de geradora de score para participante governado de um processo decisório auditável.

Essa estrutura também redefine confiança. O objetivo não é convencer o usuário de que o sistema está correto, mas permitir dependência calibrada. O decisor deve reconhecer quando a evidência é forte, quando há incerteza relevante, quando o ranking muda sob perturbações plausíveis e quando a autonomia precisa ser suspensa. Em decisões críticas, a capacidade de dizer “não sei”, abster-se, solicitar revisão ou retornar a um estado anterior é funcionalmente tão importante quanto produzir uma recomendação.

Quadro 1 – Oportunidades, ameaças e controles de governança na arquitetura proposta

Dimensão	Oportunidade	Ameaça e controle de governança
LLMs, modelos fundacionais e evidência	Estruturar documentos, cenários, alternativas e interfaces; apoiar descoberta e síntese	Alucinação, fonte desatualizada ou promocional → grounding, proveniência, validade temporal e confirmação cruzada
Quantificação de incerteza	Calibrar recomendações, permitir abstenção e distinguir diferenças robustas de aparentes	Cobertura inadequada ou drift → monitorar calibração, distribuição e sensibilidade
MCDA / prescrição	Explicitar preferências, restrições, risco e trade-offs	Preferências mal especificadas ou compensações indevidas → elicitação documentada e análise de robustez
XAI / XOpt	Explicar previsões, rankings, alternativas rejeitadas e mudanças mínimas relevantes	Explicações persuasivas porém instáveis → avaliar fidelidade, estabilidade, utilidade e contestabilidade
Agentic AI	Automatizar tarefas reversíveis, uso de ferramentas e ciclos de decisão	Ações não autorizadas, credenciais e cascatas multiagente → menor privilégio, escopos, checkpoints, monitoramento de trajetória e rollback
Governança e regulação	Converter rastreabilidade, segurança e qualidade da evidência em auditabilidade institucional	Fragmentação normativa e compliance tardio → documentação de ciclo de vida, incidentes, responsabilidades e atualização regulatória

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

2.10. DA ATRIBUIÇÃO ESTÁTICA À TRAJETÓRIA DELIBERADA DE AUTONOMIA

Mesmo as propostas mais recentes de governança de agentes tratam autonomia como decisão de projeto fixada em um ponto do tempo, não como algo que evolui deliberadamente com a evidência de confiabilidade acumulada. Feng, McDonald e Zhang (2025) definem cinco níveis escalonados de autonomia, distintos da capacidade técnica e caracterizados pelo papel do usuário: operador, colaborador, consultor, aprovador e observador. O Model AI Governance Framework for Agentic AI de Singapura (IMDA, 2026) estrutura a responsabilização humana em quatro pilares, mas não formaliza como um agente muda de nível ao longo do tempo, nem quando essa mudança deve ser revertida. Zheng et al. (2026) aproximam-se mais, propondo separar estruturalmente capacidade técnica e permissão concedida; a proposta deste capítulo é complementar: desloca o eixo da separação estrutural, num instante do tempo, para a trajetória entre níveis de permissão, com condições explícitas de avanço e reversão.

Este capítulo propõe preencher essa lacuna com o Protocolo de Trajetória Deliberada de Autonomia (PTDA): em vez de atribuir um nível fixo, cada sistema agêntico percorre uma trajetória móvel, ajustável e reversível entre os cinco níveis, na qual toda transição — de escalonamento ou de reversão — declara explicitamente sete elementos: nível de origem;

nível-alvo; evidência habilitante, isto é, o que precisa ser demonstrado para justificar a mudança; janela de observação, ou prazo mínimo de monitoramento antes de nova avaliação; indicador monitorado continuamente; responsável humano pela decisão de escalonar; e gatilho de rollback, condição objetiva que reverte automaticamente o nível de autonomia. A Figura 2 sintetiza essa lógica.

Figura 2 – Trajetória Deliberada de Autonomia: escalonamento e reversão entre níveis

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Feng, McDonald e Zhang (2025).

Diferentemente de uma classificação estática, a trajetória é não linear e reversível: a ocorrência do gatilho de rollback correspondente devolve o sistema ao nível imediatamente anterior, reinicia a janela de observação e exige o cumprimento integral da evidência habilitante para que o escalonamento seja retentado. Autonomia deixa de ser um patamar conquistado permanentemente e passa a ser uma posição provisória, sustentada continuamente por desempenho, calibração e integridade das explicações.

Aplicada ao portfólio tecnológico deste capítulo, a trajetória tornaria explícito o que um agente precisaria demonstrar para deixar de apenas consultar bases e propor priorizações (consultor) e passar a executar atualizações com ratificação humana (aprovador). O Quadro 2 ilustra quatro transições possíveis, com evidência, indicador e gatilho de rollback correspondentes; os limiares numéricos devem ser calibrados por organização, não fixados como valor universal.

Quadro 2 – Protocolo de Trajetória Deliberada de Autonomia: exemplo ilustrativo de transições em um agente de apoio a portfólio tecnológico

Transição	Evidência habilitante	Indicador monitorado (exemplo)	Gatilho de rollback (exemplo)
Operador → Colaborador	Agente reproduz, sob supervisão direta, as etapas de coleta e estruturação de evidência em múltiplos ciclos	Correspondência entre estruturação proposta e validada	Divergência recorrente entre estruturação proposta e validada
Colaborador → Consultor	Recomendações mantêm calibração e ranking estável sob perturbações plausíveis de peso	Cobertura empírica da predição conformal; robustez do ranking	Cobertura abaixo do nominal ou inversão de ranking sob perturbação pequena
Consultor → Aprovador	Explicações fiéis e estáveis entre execuções equivalentes; nenhuma ação irreversível sem justificativa auditável	Fidelidade/estabilidade das explicações; ações irreversíveis corretamente sinalizadas	Explicação instável entre execuções equivalentes ou ação irreversível não sinalizada
Aprovador → Observador	Histórico sem incidentes de permissão, orçamento ou escopo; execução dentro de limites, por período mínimo	Incidentes de governança (permissão, orçamento, escopo) por ciclo	Incidente de permissão, estouro de orçamento ou ferramenta não autorizada

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), operacionalizando os níveis de autonomia de Feng, McDonald e Zhang (2025) e os pilares de responsabilização humana de IMDA (2026).

A proposta é apresentada como framework conceitual a ser testado, não como validação empírica: sua contribuição está em tornar auditável e replicável um processo que, nas propostas institucionais mais recentes, permanece qualitativo. Essa é, também, uma limitação assumida — a calibração dos limiares de cada indicador e a definição de quem detém autoridade para decidir cada transição dependem do contexto organizacional e regulatório, e constituem agenda de pesquisa futura.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo perguntou como organizar uma arquitetura multicritério capaz de incorporar aprendizado de máquina, modelos fundacionais e sistemas agênticos sem perder controle sobre incerteza, evidência, preferência, segurança e autoridade. A resposta exige superar uma visão na qual XAI é apenas explicação pós-hoc e governança é apenas conformidade documental. Em sistemas capazes de agir, o objeto de governança passa a incluir a trajetória de decisão, o uso de ferramentas, a proveniência da evidência e as permissões efetivamente concedidas.

A resposta proposta é uma arquitetura de seis camadas - estruturação sociotécnica; inteligência baseada em dados e modelos fundacionais; incerteza e robustez; decisão multicritério/prescritiva; explicação e contestabilidade; governança humano-agente -

atravessada por controles de identidade, autorização, qualidade da evidência, monitoramento, abstenção e reversibilidade. O MCDA ocupa posição central não por competir com modelos fundacionais, mas por explicitar preferências e trade-offs que não devem ser delegados implicitamente a padrões históricos ou à fluência de um modelo. A essa arquitetura soma-se o Protocolo de Trajetória Deliberada de Autonomia, que desloca a atribuição de autonomia de classificação fixa para processo móvel e reversível, com evidência, indicador, responsável e gatilho de rollback declarados a cada transição — condição não formalizada nas propostas institucionais revisadas.

A fronteira tecnológica analisada também altera a noção de oportunidade e ameaça. A oportunidade é usar IA para ampliar a descoberta, a síntese de evidências e a execução de tarefas sem apagar preferências humanas; a ameaça é converter desempenho em autoridade e automação em legitimidade. A sequência pública do Astra em agosto de 2026 - resultados científicos de alta relevância seguidos por controles reforçados diante de possível capacidade cibernética crítica - sintetiza essa dualidade, embora permaneça baseada em avaliação do próprio desenvolvedor (OPENAI, 2026c; 2026d).

O capítulo possui limitações. A arquitetura é teórico-conceitual e requer validação empírica comparativa. Parte da literatura de fronteira de 2026 - UAXAI, explicabilidade personalizada, XOpt e governança agêntica - ainda circula como preprint ou relatório institucional, e incidentes e avaliações de modelos são frequentemente divulgados pelos próprios laboratórios, o que exige cautela contra autoavaliação sem replicação independente.

A agenda de pesquisa prioritária inclui validar o framework em portfólios tecnológicos reais; medir desempenho, calibração/cobertura, estabilidade do ranking, fidelidade da explicação e segurança operacional; testar políticas de abstenção, autorização e rollback; desenvolver métricas para qualidade/proveniência da evidência em pipelines de decisão; e comparar arquiteturas simples e agênticas para identificar quando a autonomia adicional produz benefício líquido. No contexto brasileiro, também é necessário acompanhar como o SIA, a ANPD e o PL 2338/2023 transformarão princípios de risco em controles técnicos verificáveis.

REFERÊNCIAS

ALI, R.; HUSSAIN, A.; NAZIR, S.; KHAN, S.; KHAN, H. U. Intelligent decision support systems—an analysis of machine learning and multicriteria decision-making methods. Applied Sciences, v. 13, n. 22, art. 12426, 2023. DOI: 10.3390/app132212426.

ANGELOPOULOS, A. N.; BATES, S. Conformal prediction: a gentle introduction. Foundations and Trends in Machine Learning, v. 16, n. 4, p. 494-591, 2023.

ANPD - AGÊNCIA NACIONAL DE PROTEÇÃO DE DADOS. ANPD publica Mapa de Temas Prioritários para o biênio 2026-2027 e atualiza Agenda Regulatória 2025-2026. Brasília, 24 dez. 2025. Disponível em: gov.br/anpd. Acesso em: 12 ago. 2026.

ANTHROPIC. A3: An Automated Alignment Agent for Safety Finetuning. Alignment Science Blog, 11 mar. 2026a. Disponível em: alignment.anthropic.com/2026/automated-alignment-agent/. Acesso em: 12 ago. 2026.

ANTHROPIC. AuditBench: Evaluating Alignment Auditing Techniques on Models with Hidden Behaviors. Alignment Science Blog, 10 mar. 2026b. Disponível em: alignment.anthropic.com/2026/auditbench/. Acesso em: 12 ago. 2026.

AYDIN, N.; BIRBIL, Ş. İ.; KÜÇÜKPARLAK, İ.; YALÇINTAŞ, A. Explainable Optimization: A Call for Interdisciplinary Action. arXiv:2606.08675, 2026.

BENGIO, Y. et al. International AI Safety Report 2026. DSIT 2026/001, 2026. Disponível em: internationalaisafetyreport.org. Acesso em: 12 ago. 2026.

BRASIL. Ministério da Gestão e da Inovação em Serviços Públicos. PL do governo propõe sistema de governança para a inteligência artificial no país. Brasília, 9 dez. 2025. Disponível em: gov.br/gestao. Acesso em: 12 ago. 2026.

COMISSÃO EUROPEIA. AI Act: regulatory framework for artificial intelligence. Shaping Europe's Digital Future, 2026a. Disponível em: digital-strategy.ec.europa.eu. Acesso em: 12 ago. 2026.

COMISSÃO EUROPEIA. Code of Practice on Transparency of AI-generated Content. Shaping Europe's Digital Future, 31 jul. 2026b. Disponível em: digital-strategy.ec.europa.eu. Acesso em: 12 ago. 2026.

COMISSÃO EUROPEIA. Timeline for the Implementation of the EU AI Act. AI Act Service Desk, 2026c. Disponível em: ai-act-service-desk.ec.europa.eu. Acesso em: 12 ago. 2026.

CORTES-GOMEZ, S.; PATIÑO, C.; BYUN, Y.; WU, S.; HORVITZ, E.; WILDER, B. Decision-Focused Uncertainty Quantification. arXiv:2410.01767, 2024.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. Projeto de Lei n. 2338/2023: ficha de tramitação. Brasília, 2026. Disponível em: camara.leg.br. Acesso em: 12 ago. 2026.

FENG, K. J.; MCDONALD, D. W.; ZHANG, A. X. Levels of Autonomy for AI Agents. arXiv:2506.12469, 2025.

GRECO, S.; KAROLCZAK, J.; SŁOWIŃSKI, R.; STEFANOWSKI, J. PREF-XAI: Preference-Based Personalized Rule Explanations of Black-Box Machine Learning Models. arXiv:2604.19684, 2026.

HWANG, C. L.; YOON, K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1981.

IMDA - INFOCOMM MEDIA DEVELOPMENT AUTHORITY. Model AI Governance Framework for Agentic AI. Version 1.0. Singapura, 22 jan. 2026. Disponível em: imda.gov.sg. Acesso em: 12 ago. 2026.

KUMAR, R.; PAMUCAR, D. A comprehensive and systematic review of multi-criteria decision-making (MCDM) methods to solve decision-making problems: two decades from 2004 to 2024. Spectrum of Decision Making and Applications, v. 2, n. 1, p. 178-197, 2025. DOI: 10.31181/sdmap21202524.

LUNDBERG, S. M.; LEE, S.-I. A unified approach to interpreting model predictions. In: ADVANCES IN NEURAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS 30. 2017. p. 4765-4774.

LÖFSTRÖM, H.; LÖFSTRÖM, T.; HJORT, A.; YAPICIOGLU, F. R. Concerning Uncertainty: A Systematic Survey of Uncertainty-Aware XAI. arXiv:2603.26838, 2026.

MCKENZIE, I. R.; HOLLINSWORTH, O. J.; TSENG, T.; DAVIES, X.; CASPER, S.; TUCKER, A. D.; KIRK, R.; GLEAVE, A. STACK: Adversarial Attacks on LLM Safeguard Pipelines. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, v. 40, n. 44, p. 37728-37737, 2026. DOI: 10.1609/aaai.v40i44.41108.

NGUYEN, T. T. H.; FOURNIER, H.; JACKSON, P.; ITOH, M.; FREEMAN, S.; RICHARD, R.; CAO, H. Position: Multi-Agent Algorithmic Care Systems Demand Contestability for Trustworthy AI. arXiv:2603.20595, 2026.

NIST - NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. Accelerating the Adoption of Software and Artificial Intelligence Agent Identity and Authorization: Concept Paper. Gaithersburg, 5 fev. 2026b. Disponível em: csrc.nist.gov. Acesso em: 12 ago. 2026.

NIST - NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. AI Agent Standards Initiative. Gaithersburg, 17 fev. 2026a. Disponível em: nist.gov/artificial-intelligence/ai-agent-standards-initiative. Acesso em: 12 ago. 2026.

OPENAI. Responding to the next frontier of critical cyber capabilities. 7 ago. 2026d. Disponível em: openai.com/index/responding-next-frontier-critical-cyber-capabilities/. Acesso em: 12 ago. 2026.

OPENAI. Ten advances in mathematics and theoretical computer science. 1 ago. 2026c. Disponível em: openai.com/index/ten-advances-in-mathematics/. Acesso em: 12 ago. 2026.

RIBEIRO, M. T.; SINGH, S.; GUESTRIN, C. “Why should I trust you?”: explaining the predictions of any classifier. In: PROCEEDINGS OF THE 22ND ACM SIGKDD INTERNATIONAL

CONFERENCE ON KNOWLEDGE DISCOVERY AND DATA MINING. New York: ACM, 2016. p. 1135-1144.

ROY, B. Multicriteria Methodology for Decision Aiding. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

SAATY, T. L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York: McGraw-Hill, 1980.

SHEKHOVTSOV, A.; OSKOOEI, A. R.; SAŁABUN, W. Towards Trustworthy LLM Decision Support through MCDA Integration. In: 18th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2026). v. 4. 2026. p. 3150-3157.

WANG, T. et al. Optimal Decision-Making Based on Prediction Sets. arXiv:2602.00989, 2026.

ZHENG, H.; DONG, Q.; DEPENA, R. K.; BHATIA, J. D.; XIAO, F.; XU, P. Separating Capability from Permission: A Governance Framework for Agentic AI Autonomy Levels. arXiv:2607.23438, 2026.

CAPÍTULO II

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA CINEMÁTICA, PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA E DINÂMICA DE UM MANIPULADOR PRP BASEADO NO ROBÔ COMERCIAL PLATECRANE EX (HUDSON ROBOTICS)

MODELING AND SIMULATION OF THE KINEMATICS, TRAJECTORY PLANNING AND DYNAMICS OF A PRP MANIPULATOR BASED ON THE PLATECRANE EX COMMERCIAL ROBOT (HUDSON ROBOTICS)

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-2

Igor Lourenço Lopes [1]
Flávio Luiz Rossini [2]

[1] Discente do curso de Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Campo Mourão.
[2] Docente do curso de Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Campo Mourão.

RESUMO

Neste trabalho, apresentou-se a modelagem matemática e a simulação computacional de um manipulador robótico do tipo PRP, composto por uma junta prismática vertical, uma junta rotativa e uma junta prismática radial. A topologia adotada baseou-se no robô comercial de manuseio de microplacas PlateCrane EX, da Hudson Robotics, com parâmetros representativos de um manipulador conceitual em escala de bancada. Descreveu-se a cinemática por matrizes de transformação homogênea, com espaço de trabalho cilíndrico, e obtiveram-se as soluções analíticas da cinemática direta e da cinemática inversa. Planejou-se a trajetória no espaço de juntas por polinômios cúbicos, com velocidades nulas nos instantes inicial e final. Calcularam-se os esforços generalizados pelo algoritmo recursivo de Newton–Euler e apresentaram-se as equações dinâmicas do manipulador em forma fechada, decompostas em parcelas inercial, de velocidade, gravitacional e de atrito viscoso. Implementaram-se os modelos em MATLAB e avaliaram-se os resultados por meio de tabelas de desempenho, perfis de posição, velocidade e aceleração, reconstrução cartesiana da trajetória e cômputo dos esforços dinâmicos. Validou-se a implementação pela dinâmica direta: aplicaram-se os esforços calculados às equações do movimento, integradas pelo método de Euler, e reconstruiu-se a trajetória planejada com erro máximo inferior a $0{,}05\ \%$ do deslocamento total de cada junta. O estudo de convergência do integrador confirmou o decaimento linear do erro com o passo, e a análise de potência e energia quantificou a demanda dos atuadores, concentrada na junta vertical. Os resultados obtidos demonstram a coerência entre as formulações cinemática e dinâmica e fornecem uma base reprodutível para estudos de simulação, dimensionamento preliminar e controle de manipuladores PRP.

Palavras-chave: Manipulador PRP. Cinemática. Planejamento de trajetória. Newton–Euler. Simulação computacional.

ABSTRACT

This work presents the mathematical modeling and computational simulation of a PRP robotic manipulator, composed of a vertical prismatic joint, a revolute joint, and a radial prismatic joint. The adopted topology is based on the PlateCrane EX commercial microplate-handling robot, manufactured by Hudson Robotics, with parameters representative of a bench-scale conceptual manipulator. The kinematics is described by homogeneous transformation matrices, considering a cylindrical workspace, and the analytical solutions of the forward and inverse kinematics are obtained. The trajectory is planned in joint space by cubic polynomials, with zero velocities at the initial and final instants. The generalized joint efforts are computed by the recursive Newton–Euler algorithm, and the closed-

form dynamic equations of the manipulator are presented, decomposed into inertial, velocity-dependent, gravitational, and viscous friction terms. The models are implemented in MATLAB and evaluated through performance tables, position, velocity, and acceleration profiles, Cartesian trajectory reconstruction, and dynamic effort computation. The implementation is validated by forward dynamics: the computed efforts are applied to the equations of motion, integrated by Euler's method, and the planned trajectory is reconstructed with a maximum error below $0.05\,\%$ of the total displacement of each joint. The convergence study confirms the linear decay of the error with the step size, and the power and energy analysis quantifies the actuator demand, concentrated in the vertical joint. The results demonstrate the consistency between the kinematic and dynamic formulations and provide a reproducible basis for simulation studies, preliminary actuator sizing, and control of PRP manipulators.

Keywords: PRP manipulator. Kinematics. Trajectory planning. Newton–Euler. Computational simulation.

1. INTRODUÇÃO

A robótica aplicada à indústria, à automação laboratorial e a sistemas de manipulação desempenha papel central em tarefas que exigem repetibilidade, precisão e controle de movimento (Craig, 2012; Siciliano; Khatib, 2016). Entre as diversas configurações cinemáticas possíveis, os manipuladores do tipo PRP, compostos por uma junta prismática, uma junta rotativa e outra junta prismática, apresentam uma estrutura naturalmente associada a espaços de trabalho cilíndricos (Fu; Gonzalez; Lee, 1987). Essa configuração permite o controle direto da altura, da orientação angular e do alcance radial do efetuador. A arquitetura está presente em equipamentos comerciais de automação laboratorial, como o manipulador de microplacas PlateCrane EX, cujo posicionador combina curso vertical, rotação da torre e braço telescópico radial para transferir amostras entre instrumentos de análise (Hudson Robotics, [s. d.]); esse equipamento, fabricado pela Hudson Robotics, motivou a configuração adotada neste estudo.

A análise de um manipulador robótico organiza-se em etapas complementares: a cinemática direta, a cinemática inversa, o planejamento de trajetória e a modelagem dinâmica (Craig, 2012; Spong; Hutchinson; Vidyasagar, 2006; Pontim et al., 2026). A cinemática direta determina a posição do efetuador a partir das variáveis de junta, com aplicações recentes a manipuladores de três e de quatro graus de liberdade e a robôs industriais (Oliveira et al., 2025; Pontim; Rossini; Oliveira, 2025; Rossini; Santos; Rossini, 2025b; Rossini; Santos; Rossini, 2025a; Souza; Santos; Rossini, 2025), enquanto a cinemática inversa resolve o problema oposto, essencial para tarefas definidas no espaço operacional (Pontim et al., 2025).

O planejamento de trajetória no espaço de juntas constitui abordagem clássica para manipuladores industriais. Entre os métodos possíveis, os polinômios cúbicos destacam-se

pela simplicidade e pela capacidade de garantir velocidade nula nos instantes inicial e final (Spong; Hutchinson; Vidyasagar, 2006; Barbosa et al., 2025; Pontim; Rossini; Oliveira, 2025; Rossini; Santos; Rossini, 2025b). Essa característica produz movimentos suaves e compatíveis com limites físicos de atuadores.

A modelagem dinâmica, por sua vez, permite estimar os esforços generalizados exigidos em cada junta durante o movimento (Craig, 2012; Siciliano et al., 2010). O algoritmo recursivo de Newton–Euler destaca-se pela eficiência computacional e pela estrutura sistemática, composta por uma varredura externa, de propagação de velocidades e acelerações, e uma varredura interna, de propagação de forças e momentos (Craig, 2012; Siciliano et al., 2010; Asada; Slotine, 1986). A partir da aplicação simbólica do algoritmo, obtêm-se as equações dinâmicas do mecanismo em forma fechada, adequadas ao projeto de estratégias de controle e ao dimensionamento preliminar de atuadores.

Neste contexto, o presente trabalho abordou o seguinte problema: como modelar matematicamente e simular computacionalmente um manipulador PRP de forma integrada, da cinemática à dinâmica? O objetivo geral consistiu em desenvolver e simular o modelo matemático completo do manipulador. Os objetivos específicos compreenderam: (i) obter a cinemática direta por transformações homogêneas; (ii) deduzir a solução analítica da cinemática inversa; (iii) caracterizar o Jacobiano e a condição de singularidade; (iv) planejar trajetórias suaves por polinômios cúbicos; (v) obter, pelo algoritmo recursivo de Newton–Euler, as equações dinâmicas em forma fechada; e (vi) simular as equações obtidas em MATLAB (Corke, 2017), com validação pela dinâmica direta integrada pelo método de Euler.

O texto organiza-se da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a fundamentação teórica; a Seção 3 descreve a metodologia; a Seção 4 desenvolve as soluções analíticas para o manipulador PRP; a Seção 5 apresenta os resultados numéricos e as simulações; e a Seção 6 encerra o trabalho com as conclusões.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, apresentam-se as equações gerais que fundamentam a modelagem: as transformações homogêneas, a cinemática de velocidades e acelerações de corpos rígidos, a distribuição de massa, as equações de Newton e de Euler, o polinômio cúbico de trajetória e o método de integração numérica de Euler.

2.1. TRANSFORMAÇÕES HOMOGÊNEAS

A posição e a orientação de um sistema de referência $\{B\}$ em relação a um sistema $\{A\}$ descrevem-se por uma matriz de transformação homogênea (Paul, 1981; Craig, 2012)

$$ {}^{A}T_{B} = \begin{bmatrix} {}^{A}R_{B} & {}^{A}\boldsymbol{p}_{B} \\ \mathbf{0}^{T} & 1 \end{bmatrix}, \tag{1} $$

sendo ${}^{A}R_{B} \in \mathbb{R}^{3\times3}$ a matriz de rotação e ${}^{A}\boldsymbol{p}_{B} \in \mathbb{R}^{3}$ o vetor de posição da origem de $\{B\}$ expresso em $\{A\}$. Para uma cadeia cinemática serial de n elos, a transformação da base ao efetuador resulta da composição

$$ {}^{0}T_{n} = {}^{0}T_{1}\,{}^{1}T_{2} \cdots {}^{n-1}T_{n}. \tag{2} $$

As transformações elementares de translação ao longo de um eixo e de rotação em torno de um eixo constituem os blocos básicos dessa composição. A rotação em torno do eixo z por um ângulo θ expressa-se por

$$ R_{z}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{3} $$

Nas transformações homogêneas, a rotação pura em torno de z e as translações puras ao longo dos eixos assumem as formas

$$ \mathrm{Rot}_{z}(\theta) = \begin{bmatrix} R_{z}(\theta) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^{T} & 1 \end{bmatrix}, \qquad \mathrm{Trans}_{z}(d) = \begin{bmatrix} I_{3} & d\,\hat{\boldsymbol{z}} \\ \mathbf{0}^{T} & 1 \end{bmatrix}, \qquad \mathrm{Trans}_{x}(a) = \begin{bmatrix} I_{3} & a\,\hat{\boldsymbol{x}} \\ \mathbf{0}^{T} & 1 \end{bmatrix}, \tag{4} $$

sendo I_3 a matriz identidade de ordem 3 e $\hat{\boldsymbol{x}}$, $\hat{\boldsymbol{z}}$ os versores dos eixos coordenados. A inversa de uma transformação homogênea possui forma fechada,

$$ {}^{B}T_{A} = ({}^{A}T_{B})^{-1} = \begin{bmatrix} {}^{A}R_{B}^{T} & -{}^{A}R_{B}^{T}\,{}^{A}\boldsymbol{p}_{B} \\ \mathbf{0}^{T} & 1 \end{bmatrix}, \tag{5} $$

propriedade que dispensa a inversão numérica da matriz completa e sustenta a solução de problemas cinemáticos por manipulação algébrica.

2.2. VELOCIDADES E ACELERAÇÕES DE CORPOS RÍGIDOS

A descrição do movimento de corpos rígidos parte da derivada temporal de um vetor expresso em um referencial girante. Para um vetor $\boldsymbol{r}$ descrito no sistema $\{B\}$, que gira com velocidade angular ${}^{A}\Omega_{B}$ em relação ao sistema $\{A\}$, vale a relação fundamental (Craig, 2012)

$$ \left.\frac{d\boldsymbol{r}}{dt}\right|_{A} = \left.\frac{d\boldsymbol{r}}{dt}\right|_{B} + {}^{A}\Omega_{B} \times \boldsymbol{r}, \tag{6} $$

da qual decorrem as regras de composição de velocidades e acelerações. Para um ponto Q descrito no sistema $\{B\}$, a velocidade linear em relação ao sistema $\{A\}$ expressa-se por

$$^{A}V_{Q} = {}^{A}V_{B} + {}^{A}_{B}R\ {}^{B}V_{Q} + {}^{A}\Omega_{B} \times {}^{A}_{B}R\ {}^{B}Q, \tag{7}$$

com parcelas de arrasto, relativa e de rotação, respectivamente. A velocidade angular, por sua vez, compõe-se de forma aditiva. Sejam $\{A\}$, $\{B\}$ e $\{C\}$ sistemas de referência, com $\{B\}$ em rotação relativa a $\{A\}$ e $\{C\}$ em rotação relativa a $\{B\}$; a velocidade angular resultante expressa-se por (Craig, 2012)

$$^{A}\Omega_{C} = {}^{A}\Omega_{B} + {}^{A}_{B}R\ {}^{B}\Omega_{C}. \tag{8}$$

A derivação da Equação (8) em relação ao tempo fornece a aceleração angular

$$^{A}\dot{\Omega}_{C} = {}^{A}\dot{\Omega}_{B} + {}^{A}_{B}R\ {}^{B}\dot{\Omega}_{C} + {}^{A}\Omega_{B} \times {}^{A}_{B}R\ {}^{B}\Omega_{C}. \tag{9}$$

Para um ponto Q descrito no sistema $\{B\}$, a aceleração linear em relação ao sistema $\{A\}$, no caso geral, expressa-se por

$$^{A}\dot{V}_{Q} = {}^{A}\dot{V}_{B} + {}^{A}_{B}R\ {}^{B}\dot{V}_{Q} + 2\,{}^{A}\Omega_{B} \times {}^{A}_{B}R\ {}^{B}V_{Q} + {}^{A}\dot{\Omega}_{B} \times {}^{A}_{B}R\ {}^{B}Q + {}^{A}\Omega_{B} \times ({}^{A}\Omega_{B} \times {}^{A}_{B}R\ {}^{B}Q), \tag{10}$$

na qual se identificam, respectivamente, a aceleração de arrasto, a aceleração relativa, a aceleração de Coriolis, a parcela tangencial e a parcela centrípeta. O termo de Coriolis, proporcional ao dobro do produto vetorial entre a velocidade angular e a velocidade relativa, mostra-se relevante para juntas prismáticas montadas sobre elos em rotação, caso presente no manipulador em estudo.

2.3. DISTRIBUIÇÃO DE MASSA E TENSOR DE INÉRCIA

A distribuição de massa de um corpo rígido em rotação caracteriza-se pelo tensor de inércia. Em um sistema de referência $\{A\}$ fixo ao corpo, o tensor expressa-se por (Craig, 2012)

$$^{A}I = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix}, \tag{11}$$

sendo I_{xx}, I_{yy} e I_{zz} os momentos de inércia de massa e I_{xy}, I_{xz} e I_{yz} os produtos de inércia de massa. Para um paralelepípedo homogêneo de massa m e dimensões K, L e Q ao longo dos eixos locais x, y e z, com origem no centro de massa e eixos alinhados às arestas, os produtos de inércia anulam-se e o tensor assume a forma diagonal

$$I = \begin{bmatrix} m/12\,(L^2+Q^2) & 0 & 0 \\ 0 & m/12\,(K^2+Q^2) & 0 \\ 0 & 0 & m/12\,(K^2+L^2) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Quando o tensor de inércia é conhecido no centro de massa e deseja-se expressá-lo em um sistema deslocado, aplica-se o teorema dos eixos paralelos (Craig, 2012),

$$^{A}I = {}^{C}I + m[\boldsymbol{P}_c^T \boldsymbol{P}_c\, I_3 - \boldsymbol{P}_c\, \boldsymbol{P}_c^T], \quad (13)$$

sendo $\boldsymbol{P}_c$ o vetor da origem do novo sistema ao centro de massa. Em particular, o momento de inércia em torno de um eixo afastado de uma distância r do centro de massa acresce-se da parcela $m\,r^2$, resultado que reaparece na matriz de massa de manipuladores, na qual a inércia efetiva de um elo em rotação depende do raio instantâneo ocupado por seu centro de massa.

2.4. EQUAÇÕES DE NEWTON E DE EULER

O movimento de um corpo rígido rege-se por duas equações complementares (Craig, 2012). A equação de Newton relaciona a força resultante $\boldsymbol{F}$ aplicada no centro de massa à aceleração linear $\dot{\boldsymbol{v}}_C$ desse ponto, obtida conforme a Equação (10),

$$\boldsymbol{F} = m\,\dot{\boldsymbol{v}}_C, \quad (14)$$

e a equação de Euler relaciona o momento resultante $\boldsymbol{N}$ à velocidade e à aceleração angulares do corpo, obtidas conforme as Equações (8) e (9),

$$\boldsymbol{N} = {}^{C}I\,\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times {}^{C}I\,\boldsymbol{\omega}, \quad (15)$$

sendo ${}^{C}I$ o tensor de inércia expresso em um sistema com origem no centro de massa. As Equações (14) e (15) constituem a base do algoritmo dinâmico apresentado na Seção 3.

2.5. POLINÔMIO CÚBICO DE TRAJETÓRIA

Para conectar uma configuração inicial q_0 a uma configuração final q_f em um intervalo T, adota-se um polinômio de terceiro grau

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3. \quad (16)$$

A imposição das condições de contorno $q(0) = q_0$, $q(T) = q_f$, $\dot{q}(0) = 0$ e $\dot{q}(T) = 0$ à Equação (16) e à sua derivada conduz ao sistema linear

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & T & T^2 & T^3 \\ 0 & 1 & 2T & 3T^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ 0 \\ q_f \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

cuja solução determina os coeficientes (Craig, 2012; Spong; Hutchinson; Vidyasagar, 2006)

$$a_0 = q_0, \qquad a_1 = 0, \qquad a_2 = \frac{3\,(q_f - q_0)}{T^2}, \qquad a_3 = -\frac{2\,(q_f - q_0)}{T^3}. \tag{18}$$

O polinômio cúbico garante continuidade de posição e de velocidade, mas não de aceleração nos extremos do movimento: a partir do repouso, a aceleração assume os valores $\pm 6(q_f - q_0)/T^2$ em $t = 0$ e $t = T$, o que corresponde a uma variação abrupta nesses instantes. Aplicações com requisito de aceleração nula nos extremos podem adotar polinômios de quinta ordem, ao custo de condições de contorno adicionais (Craig, 2012).

2.6. INTEGRAÇÃO NUMÉRICA PELO MÉTODO DE EULER

A simulação de um sistema dinâmico descrito por $\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(t, \boldsymbol{x})$ requer a integração numérica das equações do movimento. O método de Euler explícito aproxima a solução por (Chapra; Canale, 2016)

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{x}_k + h\,\boldsymbol{f}(t_k, \boldsymbol{x}_k), \tag{19}$$

sendo h o passo de integração. O método decorre do truncamento da expansão em série de Taylor da solução,

$$\boldsymbol{x}(t_k + h) = \boldsymbol{x}(t_k) + h\,\dot{\boldsymbol{x}}(t_k) + \frac{h^2}{2}\,\ddot{\boldsymbol{x}}(\xi), \qquad \xi \in [t_k,\, t_k + h], \tag{20}$$

no termo de primeira ordem: o resto desprezado corresponde ao erro local de truncamento, $O(h^2)$, e o acúmulo desse erro ao longo dos T/h passos do intervalo produz erro global de primeira ordem, $O(h)$ (Chapra; Canale, 2016). Em consequência, a redução do passo pela metade reduz o erro global aproximadamente pela metade, comportamento verificável em escala logarítmica e adotado neste trabalho como critério de aferição da simulação. Métodos de ordem superior, como os de Runge–Kutta, alcançam a mesma precisão com passos maiores, ao custo de mais avaliações da dinâmica por passo (Chapra; Canale, 2016); adotou-se o método de Euler pela simplicidade de implementação e pelo controle direto da relação entre passo e precisão.

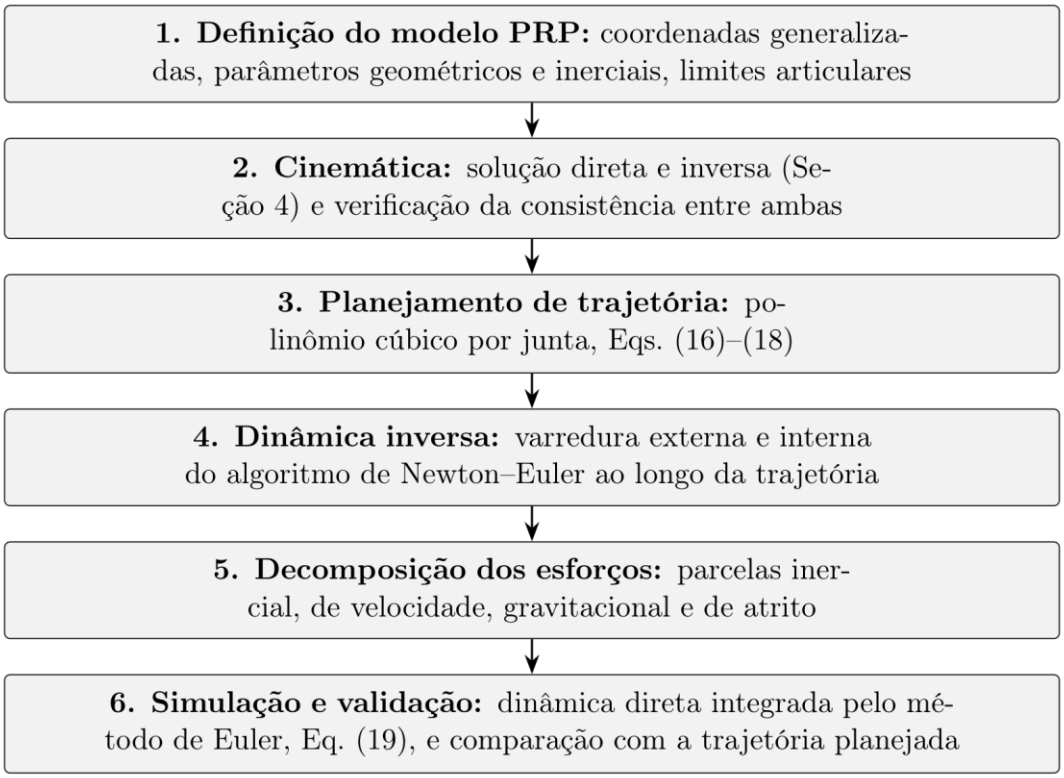
3. METODOLOGIA

Nesta seção, apresentam-se o fluxo geral do estudo, o algoritmo dinâmico iterativo de Newton–Euler, que adapta as equações da Seção 2 à notação de manipuladores, e o procedimento de simulação e validação.

3.1. FLUXO GERAL DO ESTUDO

A Figura 1 sintetiza a sequência de etapas adotada, da definição do modelo à validação por dinâmica direta.

Figura 1 – Fluxograma das etapas de modelagem, simulação e validação.



Fonte: Autoria própria.

3.2. ALGORITMO DINÂMICO ITERATIVO DE NEWTON–EULER

O algoritmo recursivo de Newton–Euler organiza as Equações (8) a (15) na notação de manipuladores seriais (Craig, 2012; Siciliano et al., 2010). Na *varredura externa*, com iterações $i: 0 \to n-1$, propagam-se as velocidades e acelerações da base para o efetuador. Para uma junta rotativa $i+1$, tem-se, respectivamente, a velocidade angular, a aceleração angular e a aceleração linear da origem do elo seguinte,

$$ {}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}_{i}R\ {}^{i}\omega_i + \dot{\theta}_{i+1}\ {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1}, \tag{21} $$

$$ {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}_{i}R\ {}^{i}\dot{\omega}_i + {}^{i+1}_{i}R\ {}^{i}\omega_i \times \dot{\theta}_{i+1}\ {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1}\ {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1}, \tag{22} $$

$$ {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}^{i+1}_{i}R\left({}^{i}\dot{\omega}_i \times {}^{i}P_{i+1} + {}^{i}\omega_i \times \left({}^{i}\omega_i \times {}^{i}P_{i+1}\right) + {}^{i}\dot{v}_i\right), \tag{23} $$

sendo ${}^{i}P_{i+1}$ o vetor da origem do sistema $\{i\}$ à origem do sistema $\{i+1\}$ e ${}^{i+1}\hat{Z}_{i+1}$ o versor do eixo da junta. Para uma junta prismática $i+1$, as relações correspondentes de velocidade angular, aceleração angular e aceleração linear são

$$ {}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}_{i}R\ {}^{i}\omega_i, \tag{24} $$

$$ {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}_{i}R\ {}^{i}\dot{\omega}_i, \tag{25} $$

$$ {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}^{i+1}_{i}R\left({}^{i}\dot{\omega}_i \times {}^{i}P_{i+1} + {}^{i}\omega_i \times \left({}^{i}\omega_i \times {}^{i}P_{i+1}\right) + {}^{i}\dot{v}_i\right) + 2\,{}^{i+1}\omega_{i+1} \times \dot{d}_{i+1}\ {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{d}_{i+1}\ {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1}, \tag{26} $$

nas quais o penúltimo termo da Equação (26) corresponde à aceleração de Coriolis identificada na Equação (10). Em ambos os casos, a aceleração do centro de massa do elo $i+1$, a força de inércia e o momento de inércia do elo resultam, respectivamente, de

$$ {}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} = {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times \left({}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}}\right) + {}^{i+1}\dot{v}_{i+1}, \tag{27} $$

$$ {}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1}\, {}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}}, \tag{28} $$

$$ {}^{i+1}N_{i+1} = {}^{C_{i+1}}I_{i+1}\, {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{C_{i+1}}I_{i+1}\, {}^{i+1}\omega_{i+1}, \tag{29} $$

sendo ${}^{i+1}P_{C_{i+1}}$ o vetor de posição do centro de massa do elo em seu sistema local.

Na *varredura interna*, com iterações $i: n \to 1$, propagam-se as forças e os momentos do efetuador para a base,

$$ {}^{i}f_i = {}^{i}_{i+1}R\ {}^{i+1}f_{i+1} + {}^{i}F_i, \tag{30} $$

$$ {}^{i}n_i = {}^{i}N_i + {}^{i}_{i+1}R\ {}^{i+1}n_{i+1} + {}^{i}P_{C_i} \times {}^{i}F_i + {}^{i}P_{i+1} \times {}^{i}_{i+1}R\ {}^{i+1}f_{i+1}, \tag{31} $$

e o esforço generalizado de cada junta obtém-se pela projeção no eixo de atuação,

$$ \tau_i = \begin{cases} {}^{i}n_i^T\, {}^{i}\hat{Z}_i, & \text{junta rotativa,} \\ {}^{i}f_i^T\, {}^{i}\hat{Z}_i, & \text{junta prismática.} \end{cases} \tag{32} $$

Para efetuador livre de contato com o ambiente, adotam-se as condições terminais da varredura interna

$$ {}^{n+1}f_{n+1} = \mathbf{0}, \qquad {}^{n+1}n_{n+1} = \mathbf{0}, \tag{33} $$

que representam a ausência de forças e momentos externos aplicados ao último elo. O efeito da gravidade incorpora-se ao algoritmo pela condição de contorno ${}^{0}\dot{v}_0 = g\,\hat{Z}_0$, equivalente a acelerar a base do manipulador para cima com o módulo da aceleração gravitacional (Craig, 2012). Ao final, adiciona-se o atrito viscoso equivalente de cada junta, de modo que o esforço total assume a estrutura

$$ \boldsymbol{\tau} = M(\boldsymbol{q})\,\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{V}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}) + B\,\dot{\boldsymbol{q}}, \tag{34} $$

sendo $M(\boldsymbol{q})$ a matriz de massa, $\boldsymbol{V}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})$ o vetor de termos de velocidade (Coriolis e centrífugos), $\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})$ o vetor gravitacional e B a matriz diagonal de coeficientes de atrito viscoso. As parcelas da Equação (34) obtêm-se por avaliações dirigidas do próprio algoritmo. Com $\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{NE}}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}, \ddot{\boldsymbol{q}})$ a saída da dinâmica inversa sem atrito, valem as relações

$$ \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\tau}_{\mathrm{NE}}(\boldsymbol{q}, \mathbf{0}, \mathbf{0}), \tag{35} $$

$$ \boldsymbol{V}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) = \boldsymbol{\tau}_{\mathrm{NE}}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}, \mathbf{0}) - \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}), \tag{36} $$

$$ M(\boldsymbol{q})\,\boldsymbol{e}_j = \boldsymbol{\tau}_{\mathrm{NE}}(\boldsymbol{q}, \mathbf{0}, \boldsymbol{e}_j) - \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}), \qquad j = 1, \ldots, n, \tag{37} $$

sendo $\boldsymbol{e}_j$ o j-ésimo vetor da base canônica: cada coluna da matriz de massa resulta da excitação unitária da aceleração da junta correspondente.

Destaca-se, ainda, o caráter recursivo do algoritmo: cada varredura percorre a cadeia uma única vez, de modo que o custo computacional cresce linearmente com o número de elos, $O(n)$. Essa propriedade torna o método adequado tanto à obtenção simbólica de equações em forma fechada, como se realiza na Seção 4, quanto à avaliação numérica repetida em malhas densas de tempo e em laços de simulação (Siciliano et al., 2010).

Em síntese, a aplicação do algoritmo ao longo de uma trajetória obedece aos passos seguintes:

1. definição dos parâmetros dos elos (m_i, ${}^{i}P_{C_i}$, ${}^{C_i}I_i$) e dos coeficientes de atrito b_i;
2. avaliação da trajetória planejada $\boldsymbol{q}(t_k)$, $\dot{\boldsymbol{q}}(t_k)$ e $\ddot{\boldsymbol{q}}(t_k)$ em cada instante discreto t_k;
3. execução da varredura externa, Eqs. (21) a (29), da base ao efetuador;
4. execução da varredura interna, Eqs. (30) a (32), do efetuador à base;
5. adição do atrito viscoso e decomposição do esforço conforme a Equação (34);
6. armazenamento dos esforços $\boldsymbol{\tau}(t_k)$ para análise e simulação.

3.3. PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO

A validação da implementação realiza-se pela dinâmica direta. A partir da Equação (34), isola-se a aceleração articular,

$$\ddot{\boldsymbol{q}} = M(\boldsymbol{q})^{-1}[\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{V}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) - \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}) - B\,\dot{\boldsymbol{q}}], \tag{38}$$

e define-se o vetor de estado $\boldsymbol{x} = [\boldsymbol{q}^T \;\; \dot{\boldsymbol{q}}^T]^T$. Os esforços $\boldsymbol{\tau}(t)$ calculados pela dinâmica inversa aplicam-se à Equação (38), integrada pelo método de Euler, Eq. (19), com passo fixo h. A trajetória articular reconstruída compara-se, então, com a trajetória planejada, e a coerência entre as dinâmicas inversa e direta quantifica-se pelo erro máximo absoluto por coordenada,

$$e_{\infty,j} = \max_k |\, q_j^{\mathrm{ref}}(t_k) - q_j^{\mathrm{sim}}(t_k) \,|, \qquad j = 1,\, 2,\, 3. \tag{39}$$

Complementarmente, afere-se a ordem de convergência do integrador pela repetição da simulação com passos sucessivamente menores, com decaimento linear de $e_{\infty,j}$ com h previsto pela Seção 2.6. Adicionalmente, verifica-se a consistência interna da implementação pela comparação entre o esforço total e a soma das parcelas da Equação (34), e verifica-se a exatidão das equações em forma fechada, obtidas na Seção 4, pela comparação com o resultado numérico do algoritmo recursivo ao longo de toda a trajetória.

3.4. ORGANIZAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A implementação realizou-se em MATLAB (Corke, 2017), em um único arquivo de simulação com funções locais, de modo a favorecer a reprodutibilidade dos resultados. A Tabela 1 relaciona as principais funções às equações correspondentes do texto.

Tabela 1 – Correspondência entre as funções da implementação e as equações do texto.

Função	Equações	Finalidade
parametrosPRP	Eq. (12)	parâmetros geométricos e inerciais
cinematicaDireta	Eqs. (2), (45)	posição do efetuador
cinematicaInversa	Eq. (48)	coordenadas articulares
trajetoriaCubica	Eqs. (53)–(55)	perfis articulares
newtonEuler	Eqs. (21)–(32)	dinâmica inversa
matrizDeMassa	Eq. (37)	matriz de massa numérica
dinamicaDireta	Eq. (38)	aceleração para simulação

Fonte: Autoria própria.

A malha temporal da dinâmica inversa adotou 500 pontos no intervalo $[0, T]$; a simulação da dinâmica direta adotou passo fixo, definido na Seção 5.2 junto ao estudo de convergência. Todas as figuras e tabelas de resultados geram-se de forma automática pela execução do arquivo único de simulação.

4. DESENVOLVIMENTO

Nesta seção, aplicam-se as equações da metodologia ao manipulador PRP em estudo, com todos os parâmetros em forma algébrica. Obtêm-se as soluções analíticas da cinemática direta, da cinemática inversa, do Jacobiano, da trajetória e das equações dinâmicas em forma fechada.

4.1. DESCRIÇÃO DO MANIPULADOR E MODELO GEOMÉTRICO

O manipulador em estudo possui três graus de liberdade, descritos pelo vetor de coordenadas generalizadas

$$\boldsymbol{q} = [d_1 \quad \theta_2 \quad d_3]^T, \tag{40}$$

sendo d_1 o deslocamento prismático vertical, θ_2 o ângulo da junta rotativa em torno do eixo vertical e d_3 o deslocamento prismático radial. Essa parametrização representa o

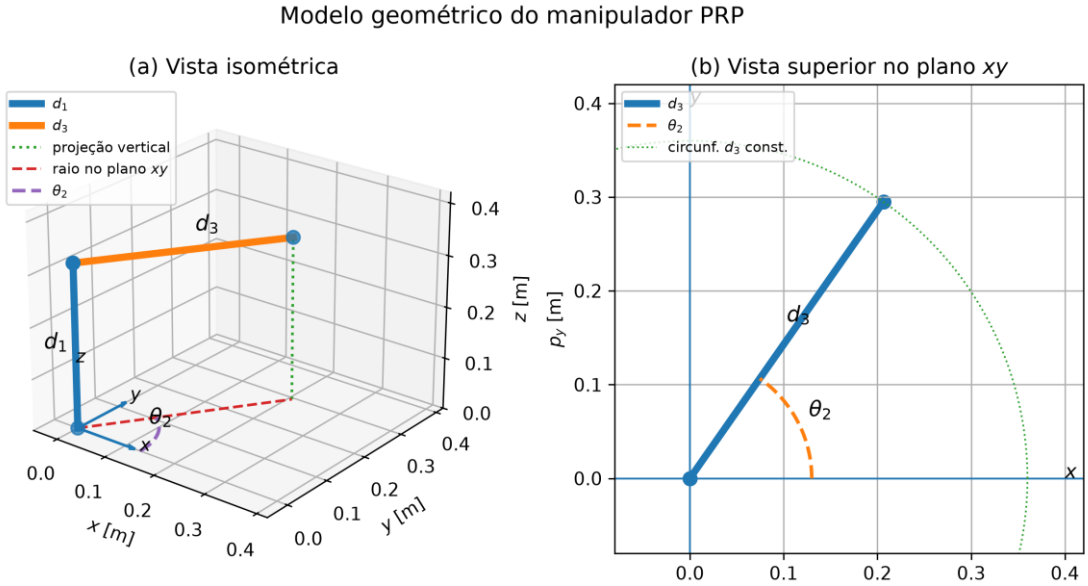
efetuador por uma coordenada de altura, uma coordenada angular e uma coordenada radial. Para fins de simulação, adotam-se os limites articulares $d_1 \in [0{,}10;\ 0{,}40]$ m, $\theta_2 \in [-\pi, \pi]$ rad e $d_3 \in [0{,}10;\ 0{,}40]$ m. O espaço de trabalho resultante corresponde a um anel cilíndrico de raio interno $d_{3,\min}$, raio externo $d_{3,\max}$ e altura igual ao curso vertical, com volume

$$V_w = \pi\left(d_{3,\max}^2 - d_{3,\min}^2\right)\left(d_{1,\max} - d_{1,\min}\right) = \pi\,(0,40^2 - 0,10^2)\,(0{,}30) \approx 0{,}141\ \text{m}^3. \quad (41)$$

A topologia em estudo baseia-se na do posicionador comercial PlateCrane EX, da Hudson Robotics (Hudson Robotics, [s. d.]), que emprega as mesmas três juntas aqui modeladas e opera em escala de bancada, com curso vertical da mesma ordem do adotado neste trabalho. Os limites e os demais parâmetros, contudo, não reproduzem um robô comercial específico: definiram-se valores representativos de um manipulador conceitual, por três razões. Primeira, o objetivo central do trabalho é a metodologia integrada de modelagem, e não o estudo de um produto: com parâmetros declarados, o fluxo completo aplica-se a qualquer manipulador PRP pela simples substituição da tabela de parâmetros. Segunda, a análise dinâmica exige massas, centros de massa e tensores de inércia de cada elo, grandezas que os fabricantes não publicam em catálogo por constituírem informação proprietária (do próprio PlateCrane EX, por exemplo, divulgam-se cursos e capacidades, não os dados inerciais); a adoção de um robô comercial obrigaria o uso de estimativas não verificáveis, enquanto os valores declarados tornam todos os resultados reprodutíveis. Terceira, a escala de bancada aproxima o modelo de um protótipo didático de laboratório, cuja construção e instrumentação constituem desdobramento natural deste estudo.

A Figura 2 apresenta o modelo geométrico do manipulador em vista isométrica e em vista superior. A junta vertical eleva o conjunto rotativo; a junta rotativa define a direção radial de operação; e a junta radial posiciona o efetuador ao longo dessa direção.

Figura 2 – Modelo geométrico do manipulador PRP: (a) vista isométrica; (b) vista superior no plano xy.



Fonte: Autoria própria.

4.2. CINEMÁTICA DIRETA

A cadeia cinemática do manipulador compõe-se de três transformações elementares da Equação (4): uma translação vertical associada a d_1, uma rotação em torno do eixo z associada a θ_2 e uma translação radial associada a d_3. Com a notação compacta $c_2 = \cos\theta_2$ e $s_2 = \sin\theta_2$, escrevem-se

$$ {}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{42} $$

O produto das duas primeiras transformações posiciona e orienta o conjunto rotativo,

$$ {}^0T_2 = {}^0T_1\,{}^1T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{43} $$

e a pós-multiplicação pela translação radial, na qual o deslocamento d_3 ao longo do eixo x local se projeta na primeira coluna da rotação acumulada, resulta na transformação completa da base ao efetuador,

$$ {}^0T_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & d_3\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & d_3\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{44} $$

da qual se extrai a formulação da cinemática direta do manipulador PRP, primeiro resultado principal deste trabalho:

$$p_x = d_3\cos\theta_2, \qquad p_y = d_3\sin\theta_2, \qquad p_z = d_1. \tag{45}$$

A coordenada vertical depende exclusivamente de d_1, enquanto as coordenadas p_x e p_y combinam o avanço radial d_3 com o ângulo θ_2, o que confirma a característica cilíndrica do espaço de trabalho. A Equação (44) também mostra que a orientação do efetuador é ${}^0R_3 = R_z(\theta_2)$: com apenas três graus de liberdade, a orientação não pode ser especificada de forma independente da posição, e o efetuador aponta sempre na direção radial definida por θ_2.

4.3. CINEMÁTICA INVERSA

O problema inverso consiste na determinação das coordenadas articulares que posicionam o efetuador em um ponto cartesiano desejado (p_x, p_y, p_z). Da terceira componente da Equação (45), obtém-se diretamente $d_1 = p_z$. A soma dos quadrados das duas primeiras componentes elimina a coordenada angular pela identidade trigonométrica fundamental,

$$p_x^2 + p_y^2 = d_3^2(\cos^2\theta_2 + \sin^2\theta_2) = d_3^2, \tag{46}$$

e fornece a coordenada radial pela raiz positiva, única fisicamente admissível para uma junta de curso $d_3 \geq 0$. Por fim, a razão entre as duas primeiras componentes recupera a coordenada angular,

$$\frac{p_y}{p_x} = \frac{d_3\sin\theta_2}{d_3\cos\theta_2} = \tan\theta_2, \tag{47}$$

resolvida pela função $atan2$, que preserva os sinais de p_x e de p_y na identificação do quadrante. Reúnem-se, assim, as três relações que constituem a formulação da cinemática inversa do manipulador, segundo resultado principal deste trabalho:

$$d_1 = p_z, \qquad d_3 = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}, \qquad \theta_2 = atan2(p_y, p_x). \tag{48}$$

A função $atan2$ evita a necessidade de tratamento manual dos quadrantes e reduz ambiguidades associadas ao cálculo angular. Quando $d_3 \to 0$, o efetuador aproxima-se do eixo de rotação, de modo que a coordenada angular perde significado físico para a posição cartesiana; essa condição representa uma singularidade geométrica do modelo. Além disso, a solução existe fisicamente apenas quando o ponto desejado pertence ao espaço de trabalho: p_z deve respeitar o curso da junta vertical e $\sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ deve respeitar os limites da junta radial, com $d_3 \geq 0$ por construção.

4.4. CINEMÁTICA DIFERENCIAL E SINGULARIDADE

A derivação da Equação (45) em relação ao tempo, pela regra da cadeia, fornece as componentes de velocidade do efetuador,

$$\dot{p}_x = \dot{d}_3 \cos\theta_2 - d_3\,\dot{\theta}_2 \sin\theta_2, \tag{49}$$

$$\dot{p}_y = \dot{d}_3 \sin\theta_2 + d_3\,\dot{\theta}_2 \cos\theta_2, \tag{50}$$

$$\dot{p}_z = \dot{d}_1, \tag{51}$$

que se organizam no mapeamento linear $\dot{\boldsymbol{p}} = J(\boldsymbol{q})\,\dot{\boldsymbol{q}}$, sendo o Jacobiano de posição

$$J(\boldsymbol{q}) = \begin{bmatrix} 0 & -d_3\sin\theta_2 & \cos\theta_2 \\ 0 & d_3\cos\theta_2 & \sin\theta_2 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \qquad \det J(\boldsymbol{q}) = -d_3. \tag{52}$$

O modelo mostra-se singular se e somente se $d_3 = 0$, o que formaliza a condição identificada na cinemática inversa: sobre o eixo de rotação, a junta θ_2 deixa de produzir deslocamento cartesiano. Define-se a medida de manipulabilidade como $w = |\det J|$; para o manipulador em estudo, portanto, $w = d_3$, ou seja, a manipulabilidade é numericamente igual ao raio de operação do efetuador. Assim, quanto mais afastado do eixo de rotação o efetuador opera, melhor o condicionamento cinemático do mecanismo; sobre o eixo, a manipulabilidade anula-se e o modelo torna-se singular. Nos limites articulares adotados ($d_3 \geq 0{,}10$ m), a trajetória simulada permanece afastada da singularidade.

4.5. TRAJETÓRIA CÚBICA NO ESPAÇO DE JUNTAS

A substituição dos coeficientes da Equação (18) na Equação (16), com derivação sucessiva, fornece os perfis de posição, velocidade e aceleração de cada junta,

$$q(t) = q_0 + 3\,\frac{(q_f - q_0)}{T^2}\,t^2 - 2\,\frac{(q_f - q_0)}{T^3}\,t^3, \tag{53}$$

$$\dot{q}(t) = 6\,\frac{(q_f - q_0)}{T^2}\,t - 6\,\frac{(q_f - q_0)}{T^3}\,t^2, \tag{54}$$

$$\ddot{q}(t) = 6\,\frac{(q_f - q_0)}{T^2} - 12\,\frac{(q_f - q_0)}{T^3}\,t. \tag{55}$$

A velocidade máxima ocorre em $t = T/2$ e vale $3(q_f - q_0)/(2T)$; a aceleração máxima, em módulo, ocorre nos extremos e vale $6(q_f - q_0)/T^2$. A terceira derivada, $\dddot{q}(t) = -12\,(q_f - q_0)/T^3$, mantém-se constante ao longo do percurso, o que caracteriza o polinômio cúbico como o perfil de menor ordem com arrancada finita no interior do intervalo; a exceção são os instantes inicial e final, nos quais a aceleração apresenta a descontinuidade discutida na Seção 2.5. Essas expressões aplicam-se de forma independente a cada uma das três coordenadas articulares do manipulador, com a duração T comum às três juntas como

parâmetro de projeto: a aceleração máxima escala com $1/T^2$, relação retomada na análise de esforços da Seção 5.2.

4.6. DINÂMICA EM FORMA FECHADA PELO ALGORITMO DE NEWTON–EULER

Para a aplicação do algoritmo da Seção 3.2, consideram-se três corpos rígidos associados aos conjuntos móveis, com massas m_1, m_2 e m_3, centros de massa definidos nos referenciais locais e tensores de inércia aproximados pela Equação (12). Adotam-se $\boldsymbol{r}_{c_1} = [0\ 0\ 0]^T$, $\boldsymbol{r}_{c_2} = [K_2/2\ 0\ 0]^T$ e $\boldsymbol{r}_{c_3} = [-K_3/2\ 0\ 0]^T$; o sinal negativo indica que o corpo do elo radial se estende da ponta, onde se encontra o efetuador, em direção ao eixo de rotação, de modo que seu centro de massa ocupa o raio $d_3 - K_3/2$, em coerência com a Figura 2.

Como as juntas do manipulador possuem eixos verticais coincidentes ou direção radial solidária à rotação, é conveniente expressar as grandezas do algoritmo no referencial da base, com o auxílio dos versores cilíndricos

$$\hat{\boldsymbol{e}}_r = [\cos\theta_2\ \ \sin\theta_2\ \ 0]^T, \qquad \hat{\boldsymbol{e}}_t = [-\sin\theta_2\ \ \cos\theta_2\ \ 0]^T, \qquad \hat{\boldsymbol{z}} = [0\ \ 0\ \ 1]^T. \tag{56}$$

Varredura externa. A propagação das velocidades angulares pelas Equações (21) e (24) resume-se, para esta cadeia, a

$$\boldsymbol{\omega}_1 = \boldsymbol{0}, \qquad \boldsymbol{\omega}_2 = \boldsymbol{\omega}_3 = \dot{\theta}_2\,\hat{\boldsymbol{z}}, \qquad \dot{\boldsymbol{\omega}}_2 = \dot{\boldsymbol{\omega}}_3 = \ddot{\theta}_2\,\hat{\boldsymbol{z}}, \tag{57}$$

pois a junta prismática vertical não introduz rotação e a junta prismática radial preserva a velocidade angular do conjunto rotativo. Com a condição de contorno ${}^0\dot{v}_0 = g\,\hat{\boldsymbol{z}}$, a aplicação das Equações (26) e (27) elo a elo fornece: para o elo 1,

$$\dot{\boldsymbol{v}}_{C_1} = (\ddot{d}_1 + g)\,\hat{\boldsymbol{z}}; \tag{58}$$

para o elo 2, em rotação pura com $\boldsymbol{\omega}_2 = \dot{\theta}_2\,\hat{\boldsymbol{z}}$ e centro de massa no raio fixo $K_2/2$,

$$\dot{\boldsymbol{v}}_{C_2} = -\,K_2/2\ \dot{\theta}_2^2\,\hat{\boldsymbol{e}}_r + K_2/2\ \ddot{\theta}_2\,\hat{\boldsymbol{e}}_t + (\ddot{d}_1 + g)\,\hat{\boldsymbol{z}}; \tag{59}$$

e, para o elo 3, cujo centro de massa ocupa o raio variável $r_c = d_3 - K_3/2$, a Equação (26) introduz as parcelas relativa e de Coriolis, e resulta

$$\dot{\boldsymbol{v}}_{C_3} = \big(\ddot{d}_3 - r_c\,\dot{\theta}_2^2\big)\hat{\boldsymbol{e}}_r + \big(r_c\,\ddot{\theta}_2 + 2\,\dot{d}_3\,\dot{\theta}_2\big)\hat{\boldsymbol{e}}_t + (\ddot{d}_1 + g)\,\hat{\boldsymbol{z}}. \tag{60}$$

O termo central da Equação (60) evidencia a aceleração de Coriolis $2\,\dot{d}_3\,\dot{\theta}_2\,\hat{\boldsymbol{e}}_t$, característica do avanço radial simultâneo à rotação e prevista na forma geral da Equação (10). As cargas de inércia seguem das Equações (28) e (29): as forças resultam de $\boldsymbol{F}_i = m_i\,\dot{\boldsymbol{v}}_{C_i}$ e, para os elos em rotação, os momentos reduzem-se a

$$\boldsymbol{N}_i = I_{zz_i}\,\ddot{\theta}_2\,\hat{\boldsymbol{z}} + \dot{\theta}_2\,\hat{\boldsymbol{z}} \times \big(I_{zz_i}\,\dot{\theta}_2\,\hat{\boldsymbol{z}}\big) = I_{zz_i}\,\ddot{\theta}_2\,\hat{\boldsymbol{z}}, \qquad i = 2,\,3, \tag{61}$$

uma vez que, com tensores diagonais e velocidade angular alinhada ao eixo z, o termo giroscópico anula-se identicamente.

Varredura interna. A propagação inicia-se no elo 3, com as condições terminais da Equação (33). A força resultante vale $\boldsymbol{f}_3 = \boldsymbol{F}_3 = m_3\,\dot{\boldsymbol{v}}_{C_3}$ e, como o eixo da junta radial coincide com $\hat{\boldsymbol{e}}_r$, a projeção da Equação (32) retém apenas a componente radial da Equação (60),

$$\boldsymbol{f}_3^T\,\hat{\boldsymbol{e}}_r = m_3\big(\ddot{d}_3 - r_c\,\dot{\theta}_2^2\big). \tag{62}$$

O momento do elo 3 em relação à sua origem acumula a parcela de Euler da Equação (61) e o momento da força de inércia aplicada no centro de massa, deslocado de $-K_3/2\;\hat{\boldsymbol{e}}_r$ em relação à origem; a componente vertical resulta em

$$n_{3,z} = I_{zz_3}\,\ddot{\theta}_2 - K_3/2\;m_3\big(r_c\,\ddot{\theta}_2 + 2\,\dot{d}_3\,\dot{\theta}_2\big). \tag{63}$$

No elo 2, a Equação (31) soma o momento próprio, o momento transportado do elo 3 e o momento da força $\boldsymbol{f}_3$, aplicada na origem do elo 3 à distância $d_3\,\hat{\boldsymbol{e}}_r$ do eixo; a componente vertical, projetada no eixo da junta rotativa, organiza-se como

$$\tau_{\theta_2}^{\text{rig}} = I_{zz_2}\,\ddot{\theta}_2 + m_2(K_2/2)^2\ddot{\theta}_2 + n_{3,z} + d_3\,m_3\big(r_c\,\ddot{\theta}_2 + 2\,\dot{d}_3\,\dot{\theta}_2\big) \tag{64}$$

$$\tau_{\theta_2}^{\text{rig}} = \big[\overline{I} + m_3\,r_c^2\big]\ddot{\theta}_2 + 2\,m_3\,r_c\,\dot{d}_3\,\dot{\theta}_2, \tag{65}$$

na qual o agrupamento $(d_3 - K_3/2) = r_c$ combina os termos das Equações (63) e (64) e reconstitui, de forma natural, o teorema dos eixos paralelos da Equação (13): a inércia efetiva do elo radial em torno do eixo de rotação vale $I_{zz_3} + m_3\,r_c^2$, dependente do raio instantâneo do centro de massa. Por fim, no elo 1, a soma das forças verticais projetada no eixo prismático fornece $(m_1 + m_2 + m_3)(\ddot{d}_1 + g)$, pois as componentes radiais e tangenciais não projetam em $\hat{\boldsymbol{z}}$. A adição do atrito viscoso $b_i\dot{q}_i$ em cada junta conduz, por fim, às equações dinâmicas do manipulador PRP em forma fechada, principal resultado da modelagem desenvolvida neste trabalho:

$$F_{d_1} = (m_1 + m_2 + m_3)\big(\ddot{d}_1 + g\big) + b_1\,\dot{d}_1, \tag{66}$$

$$\tau_{\theta_2} = \big[\overline{I} + m_3(d_3 - K_3/2)^2\big]\ddot{\theta}_2 + 2\,m_3(d_3 - K_3/2)\dot{d}_3\,\dot{\theta}_2 + b_2\,\dot{\theta}_2, \tag{67}$$

$$F_{d_3} = m_3\,\ddot{d}_3 - m_3(d_3 - K_3/2)\dot{\theta}_2^2 + b_3\,\dot{d}_3, \tag{68}$$

sendo $\overline{I} = I_{zz_2} + m_2(K_2/2)^2 + I_{zz_3}$ a parcela constante da inércia do conjunto rotativo. Na forma matricial da Equação (34), as equações correspondem a

$$M(\boldsymbol{q}) = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 + m_3 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{I} + m_3\, r_c^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, \tag{69}$$

$$\boldsymbol{V} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2\, m_3\, r_c\, \dot{d}_3\, \dot{\theta}_2 \\ -\, m_3\, r_c\, \dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix}, \qquad \boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2 + m_3)\, g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{70}$$

com $B = \mathrm{diag}(b_1, b_2, b_3)$ e $r_c = d_3 - K_3/2$. A matriz de massa mostra-se diagonal para esta estrutura: o acoplamento entre as juntas manifesta-se exclusivamente no vetor $\boldsymbol{V}$, pela parcela de Coriolis na junta rotativa e pela parcela centrífuga na junta radial. A força vertical decompõe-se em parcelas inercial, gravitacional e de atrito; o torque da junta rotativa reúne a inércia variável com o raio do centro de massa e o efeito de Coriolis; e a força radial reúne a inércia própria do elo e o efeito centrífugo. Como o elo 1 não rotaciona, seu tensor de inércia não influencia os esforços; apenas sua massa participa da dinâmica vertical.

4.7. DINÂMICA DIRETA EM FORMA EXPLÍCITA

A estrutura diagonal da matriz de massa da Equação (69) permite explicitar as acelerações articulares da Equação (38) sem inversão matricial numérica,

$$\ddot{d}_1 = \frac{F_{d_1} - b_1\, \dot{d}_1}{m_1 + m_2 + m_3} - g, \tag{71}$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{\tau_{\theta_2} - 2\, m_3\, r_c\, \dot{d}_3\, \dot{\theta}_2 - b_2\, \dot{\theta}_2}{\bar{I} + m_3\, r_c^2}, \tag{72}$$

$$\ddot{d}_3 = \frac{F_{d_3} + m_3\, r_c\, \dot{\theta}_2^2 - b_3\, \dot{d}_3}{m_3}. \tag{73}$$

Com o vetor de estado $\boldsymbol{x} = [d_1 \;\; \theta_2 \;\; d_3 \;\; \dot{d}_1 \;\; \dot{\theta}_2 \;\; \dot{d}_3]^T$, as Equações (71) a (73) definem a função $\boldsymbol{f}(t, \boldsymbol{x})$ integrada pelo método de Euler, Eq. (19), no procedimento de validação da Seção 5.2. O denominador da Equação (72) mantém-se estritamente positivo, pois $\bar{I} > 0$, o que garante a boa definição da dinâmica direta em todo o espaço de trabalho, inclusive quando o centro de massa do elo radial cruza o eixo de rotação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, apresentam-se as equações do robô em estudo com os valores numéricos adotados e, em seguida, os resultados da simulação das equações em MATLAB.

5.1. EQUAÇÕES COM OS VALORES DO ROBÔ EM ESTUDO

A Tabela 2 apresenta os parâmetros adotados. Trata-se de valores representativos de um manipulador conceitual em escala de bancada, e não dos parâmetros de um robô

comercial específico, conforme justificado na Seção 4.1. Os valores guardam coerência física entre si: as massas e dimensões dos elos 1 e 3 correspondem a densidades equivalentes de aproximadamente $2{,}7$ e $2{,}9$ g/cm^3, típicas de construção em alumínio, e a do elo 2, de $5{,}8$ g/cm^3, é compatível com um bloco que abriga o atuador da junta rotativa. As dimensões K_i, L_i e Q_i referem-se aos eixos locais x, y e z de cada elo e definem os tensores de inércia pela Equação (12). Os parâmetros de atrito viscoso constituem valores arbitrados, que representam efeitos dissipativos equivalentes nas juntas, e não grandezas identificadas experimentalmente.

Tabela 2 – Parâmetros adotados na simulação dinâmica.

Parâmetro	Valor	Unidade
m_1	2,0	kg
m_2	1,0	kg
m_3	2,5	kg
g	9,81	m/s^2
K_1, L_1, Q_1	0,070; 0,041; 0,254	m
K_2, L_2, Q_2	0,060; 0,041; 0,070	m
K_3, L_3, Q_3	0,301; 0,041; 0,070	m
$\boldsymbol{r}_{c_1}$	$[0;\ 0;\ 0]$	m
$\boldsymbol{r}_{c_2}$	$[K_2/2;\ 0;\ 0]$	m
$\boldsymbol{r}_{c_3}$	$[-K_3/2;\ 0;\ 0]$	m
b_1	1,0	N s/m
b_2	0,05	N m s/rad
b_3	0,8	N s/m

Fonte: Autoria própria.

A substituição dos valores da Tabela 2 nas Equações (66) a (68) fornece as equações dinâmicas do robô em estudo, com $\bar{I} = 0{,}0206$ kg m^2 e massa total de $5{,}5$ kg:

$$F_{d_1} = 5{,}5\,\ddot{d}_1 + 1{,}0\,\dot{d}_1 + 53{,}955 \quad [\text{N}], \tag{74}$$

$$\tau_{\theta_2} = [0{,}0206 + 2{,}5\,(d_3 - 0{,}1505)^2]\ddot{\theta}_2 + 5{,}0\,(d_3 - 0{,}1505)\,\dot{d}_3\,\dot{\theta}_2 + 0{,}05\,\dot{\theta}_2 \quad [\text{N m}], \tag{75}$$

$$F_{d_3} = 2{,}5\,\ddot{d}_3 - 2{,}5\,(d_3 - 0{,}1505)\,\dot{\theta}_2^2 + 0{,}8\,\dot{d}_3 \quad [\text{N}]. \tag{76}$$

Como verificação manual das equações e do algoritmo, avalia-se a configuração central da trajetória, $t = T/2 = 2{,}5$ s, na qual, pela simetria do polinômio cúbico, $\boldsymbol{q} = [0{,}25\ \text{m} \quad \pi/4\ \text{rad} \quad 0{,}20\ \text{m}]^T$, $\dot{\boldsymbol{q}} = [0{,}060\ \text{m/s} \quad 0{,}471\ \text{rad/s} \quad 0{,}060\ \text{m/s}]^T$ e $\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{0}$. Com acelerações articulares nulas, restam as parcelas de velocidade, gravitacional e de atrito. A varredura externa fornece $\boldsymbol{\omega}_2 = \boldsymbol{\omega}_3 = 0{,}471\,\hat{\boldsymbol{z}}$ rad/s e, com $r_c = 0{,}20 - 0{,}1505 = 0{,}0495$ m, a aceleração do centro de massa do elo radial resulta em

$$\dot{\boldsymbol{v}}_{C_3} = -0{,}0110\,\hat{\boldsymbol{e}}_r + 0{,}0565\,\hat{\boldsymbol{e}}_t + 9{,}81\,\hat{\boldsymbol{z}} \quad [\text{m/s}^2], \tag{77}$$

com parcela centrípeta $-r_c\,\dot{\theta}_2^2 = -0{,}0110$ m/s² e parcela de Coriolis $2\,\dot{d}_3\,\dot{\theta}_2 = 0{,}0565$ m/s². A varredura interna e a Equação (74) produzem, então,

$$F_{d_1} = 5{,}5\,(0 + 9{,}81) + 1{,}0 \cdot 0{,}060 = 54{,}015\ \text{N}, \tag{78}$$

$$\tau_{\theta_2} = 0 + 5{,}0 \cdot 0{,}0495 \cdot 0{,}060 \cdot 0{,}471 + 0{,}05 \cdot 0{,}471 = 0{,}0306\ \text{N m}, \tag{79}$$

$$F_{d_3} = 0 - 2{,}5 \cdot 0{,}0495 \cdot 0{,}471^2 + 0{,}8 \cdot 0{,}060 = 0{,}0205\ \text{N}, \tag{80}$$

valores que coincidem com a avaliação numérica do algoritmo recursivo no mesmo instante e ilustram, em uma configuração concreta, o encadeamento das duas varreduras. Observa-se que o torque nesse instante, composto apenas por Coriolis e atrito, aproxima-se do máximo global de $0{,}031$ N m registrado adiante na Tabela 5.

Para a cinemática, a avaliação das Equações (45) e (48) em quatro configurações representativas do espaço de trabalho produz os resultados da Tabela 3: recuperam-se os valores articulares originais e o erro de reconstrução cartesiana anula-se na precisão apresentada, o que confirma a consistência entre as duas soluções analíticas.

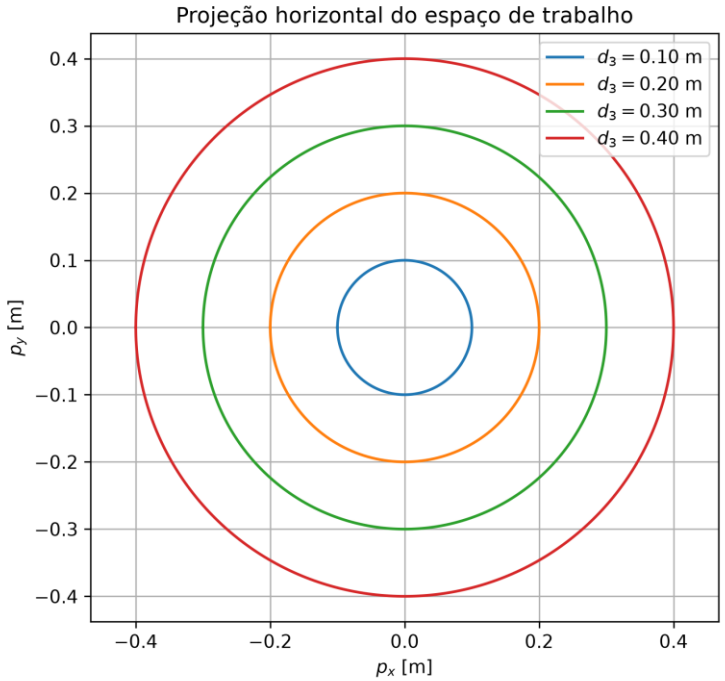
Tabela 3 – Validação entre cinemática direta e inversa.

Caso	d_1 [m]	θ_2 [rad]	d_3 [m]	p_x [m]	p_y [m]	Erro [m]
1	0,15	0,000	0,10	0,100	0,000	0,000
2	0,25	0,785	0,20	0,141	0,141	0,000
3	0,35	1,571	0,30	0,000	0,300	0,000
4	0,30	3,142	0,25	−0,250	0,000	0,000

Fonte: Autoria própria.

A Figura 3 apresenta a projeção horizontal do espaço de trabalho para valores constantes de d_3, coerente com a estrutura cilíndrica do mecanismo.

Figura 3 – Projeção horizontal do espaço de trabalho.



Fonte: Autoria própria.

Para o planejamento de trajetória, adotaram-se a duração $T = 5$ s e as configurações inicial e final

$$\boldsymbol{q}_0 = [0{,}15 \quad 0 \quad 0{,}10]^T, \qquad \boldsymbol{q}_f = [0{,}35 \quad \pi/2 \quad 0{,}30]^T. \tag{81}$$

A Tabela 4 resume os valores extremos analíticos de cada junta, obtidos das Equações (53) a (55).

Tabela 4 – Valores extremos da trajetória cúbica planejada.

Junta	Deslocamento total	Velocidade máxima	Aceleração máxima
d_1	0,20 m	0,060 m/s	0,048 m/s^2
θ_2	1,571 rad	0,471 rad/s	0,377 rad/s^2
d_3	0,20 m	0,060 m/s	0,048 m/s^2

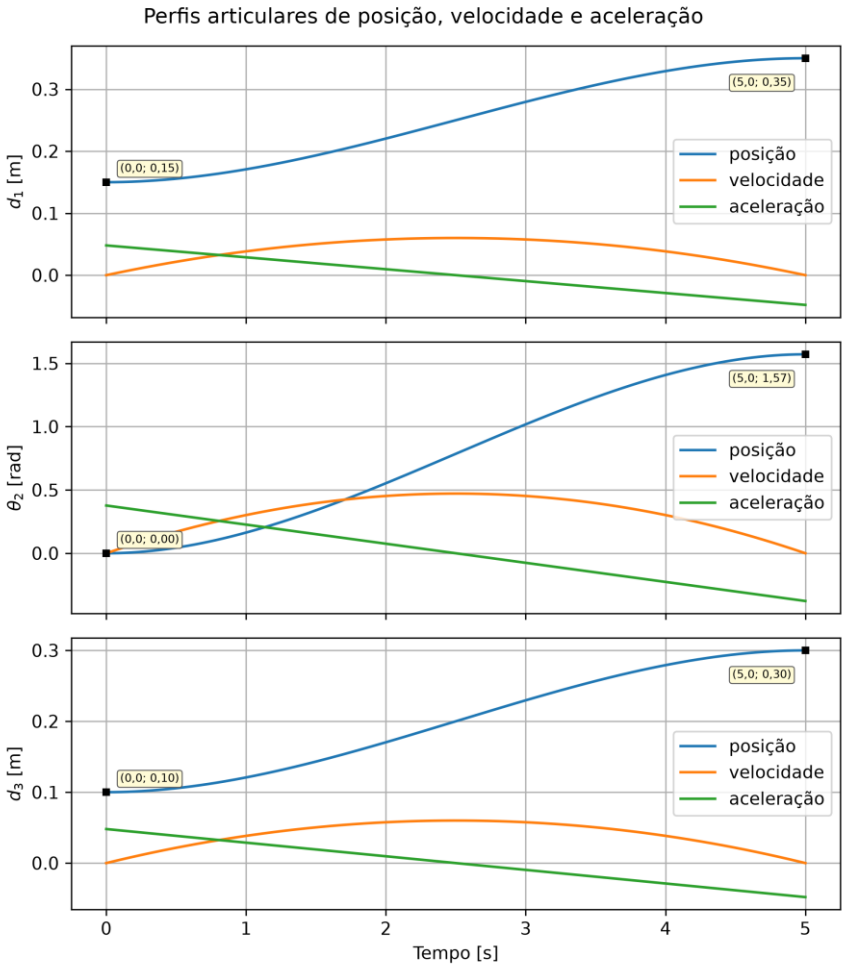
Fonte: Autoria própria.

Quanto à cinemática diferencial, a manipulabilidade $w = d_3$ cresce de $0{,}10$ a $0{,}30$ m ao longo do percurso planejado, de modo que a trajetória evolui para regiões de melhor condicionamento cinemático, sempre afastada da singularidade $d_3 = 0$.

5.2. SIMULAÇÃO DAS EQUAÇÕES

Simularam-se em MATLAB as equações dinâmicas do robô em estudo, Eq. (74), ao longo da trajetória planejada pelas Equações (53) a (55), com 500 pontos de avaliação da dinâmica inversa. A Figura 4 apresenta os perfis articulares de posição, velocidade e aceleração, avaliados pelas Equações (53) a (55) para cada junta; nas curvas de posição, marcadores de dados indicam os pontos inicial e final da simulação. As posições variam suavemente entre os valores inicial e final, as velocidades anulam-se nos extremos e as acelerações variam linearmente, conforme previsto para o polinômio cúbico.

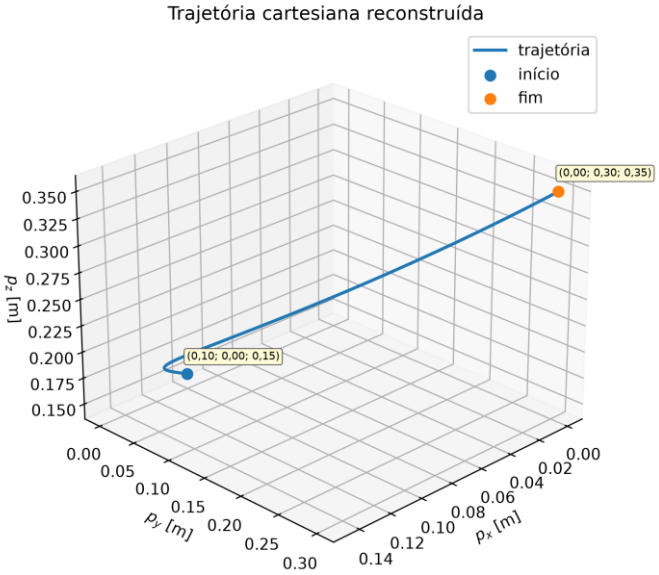
Figura 4 – Perfis articulares de posição, velocidade e aceleração.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 5 apresenta a trajetória cartesiana reconstruída pela cinemática direta, Eq. (45), aplicada aos perfis articulares das Equações (53) a (55), com as coordenadas dos pontos inicial e final indicadas na própria figura, resultado coerente com o movimento simultâneo de elevação, rotação e avanço radial do efetuador.

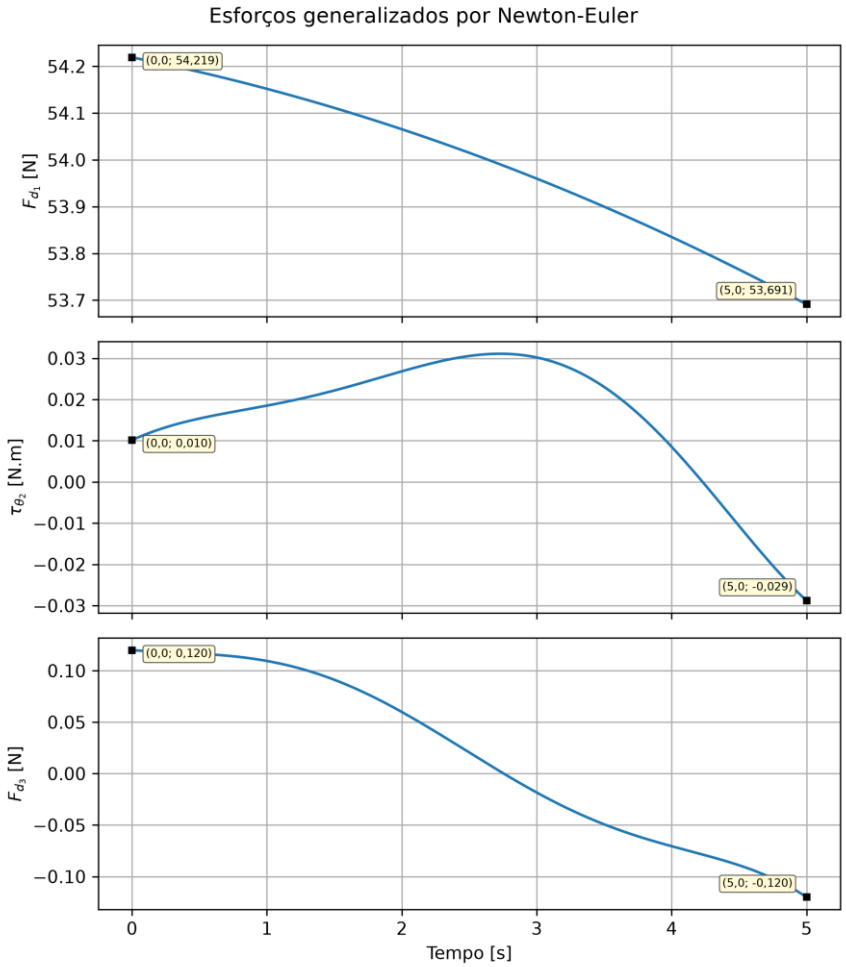
Figura 5 – Trajetória cartesiana reconstruída pela cinemática direta.



Fonte: Autoria própria.

A avaliação da Equação (74) ao longo da trajetória produz os esforços generalizados da Figura 6, resumidos na Tabela 5; na figura, marcadores de dados indicam os valores inicial e final de cada curva. A força vertical permanece próxima ao peso do conjunto móvel ($53{,}955$ N), com variação inercial de $\pm 0{,}264$ N nos trechos de aceleração e frenagem. O torque da junta rotativa combina o termo inercial, dominante nos trechos de aceleração e de frenagem angular, com os termos de Coriolis e de atrito viscoso, máximos na região central do movimento, na qual a velocidade angular é máxima. A força radial mostra-se dominada pela aceleração da junta nos extremos do movimento, com contribuição centrífuga durante a fase de rotação.

Figura 6 – Esforços generalizados calculados pela dinâmica inversa.



Fonte: Autoria própria.

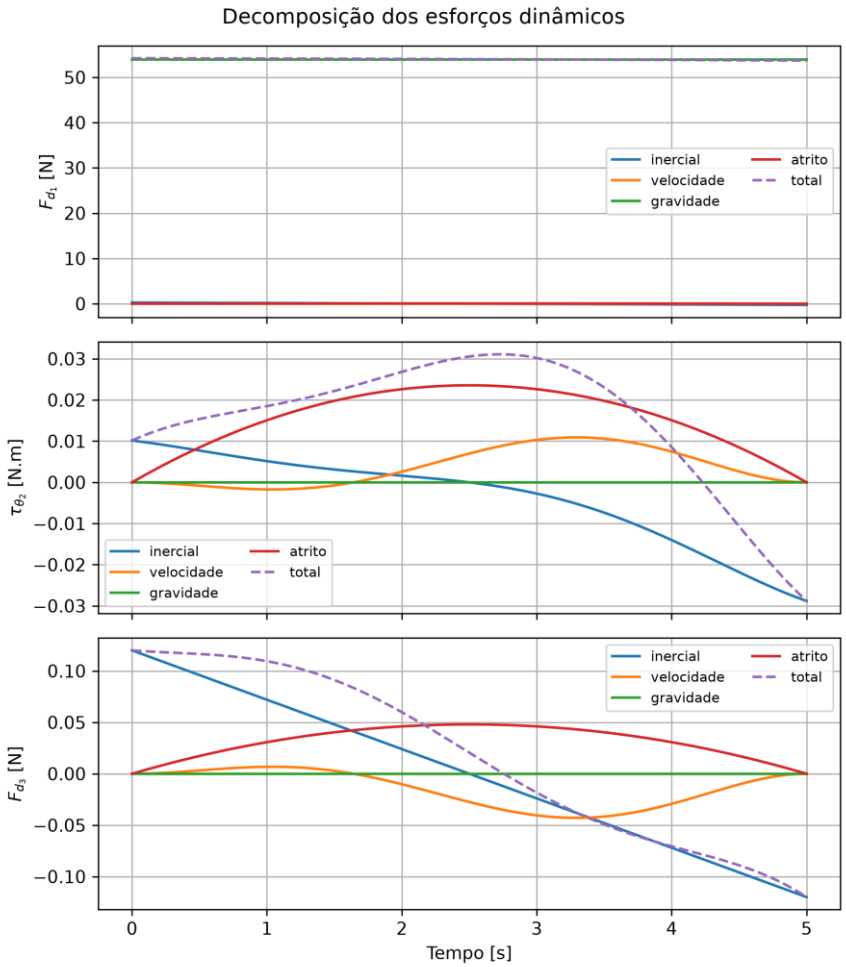
Tabela 5 – Resumo dos esforços generalizados na trajetória simulada.

Junta	Máximo absoluto	Médio absoluto	RMS
F_{d_1}	54,219 N	53,995 N	53,995 N
τ_{θ_2}	0,031 N m	0,020 N m	0,022 N m
F_{d_3}	0,120 N	0,074 N	0,082 N

Fonte: Autoria própria.

A Figura 7 apresenta a decomposição dos esforços conforme a Equação (34). A decomposição confirma que o esforço em d_1 é dominado pela gravidade, enquanto os termos de velocidade e o atrito viscoso possuem maior relevância relativa nas juntas θ_2 e d_3.

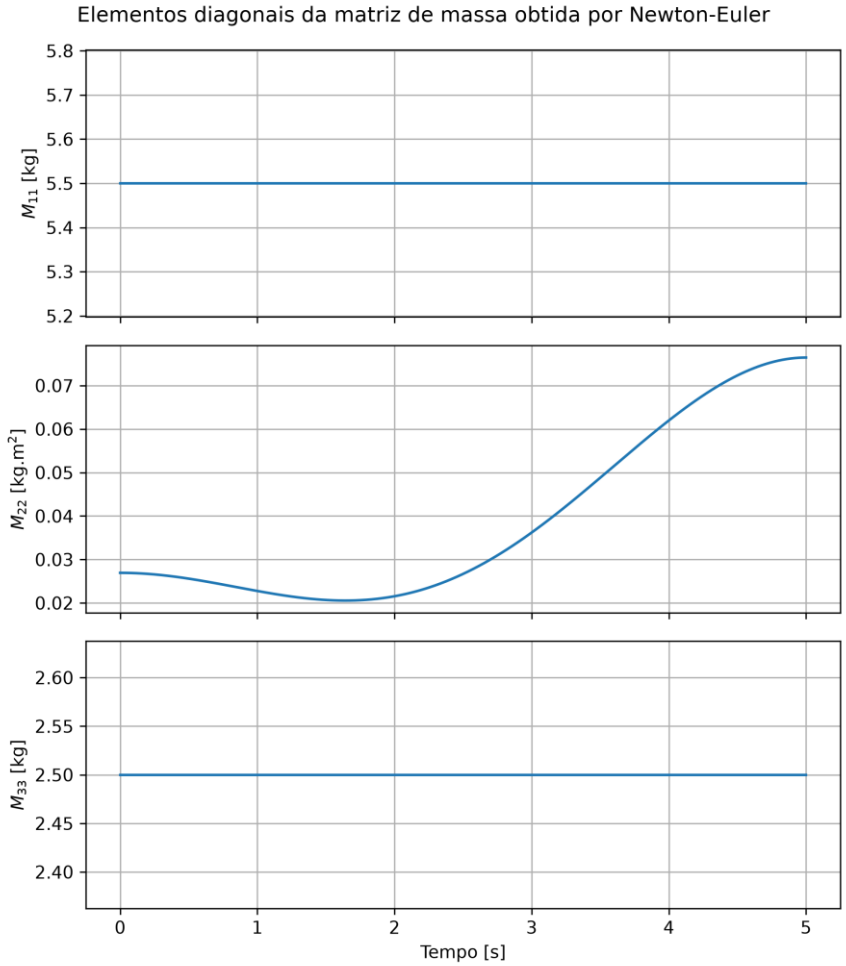
Figura 7 – Decomposição dos esforços em parcelas inercial, de velocidade, gravitacional e de atrito.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 8 apresenta os elementos diagonais da matriz de massa da Equação (69) ao longo da trajetória. O termo $M_{11} = m_1 + m_2 + m_3 = 5{,}5\ \text{kg}$ mantém-se constante, pois corresponde à massa total deslocada verticalmente, e $M_{33} = m_3 = 2{,}5\ \text{kg}$ também se mantém constante, pois representa a massa movida radialmente. Já M_{22} varia com o deslocamento radial: parte de $0{,}027\ \text{kg}\,\text{m}^2$, passa por um mínimo de $0{,}021\ \text{kg}\,\text{m}^2$ quando o centro de massa do elo radial cruza o eixo de rotação ($d_3 = K_3/2$) e atinge $0{,}076\ \text{kg}\,\text{m}^2$ no final do curso, o que reflete o afastamento do centro de massa em relação ao eixo.

Figura 8 – Elementos diagonais da matriz de massa ao longo da trajetória.



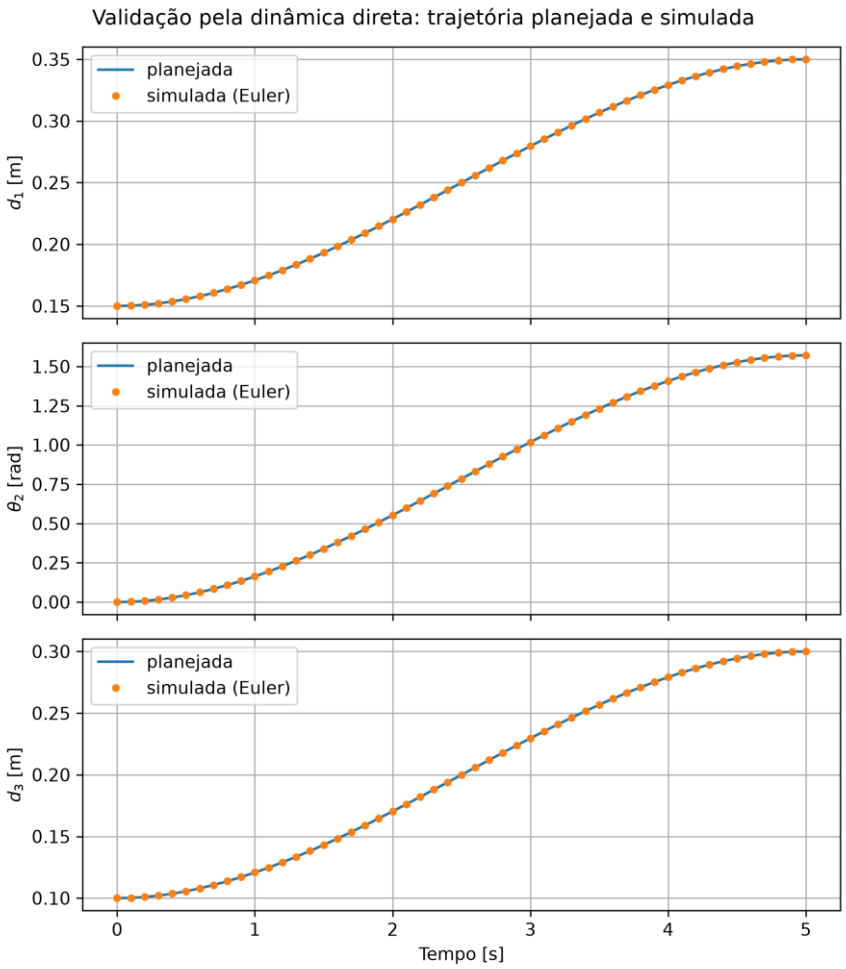
Fonte: Autoria própria.

Quanto às verificações numéricas, a decomposição da Equação (34) apresentou erro máximo da ordem de 10^{-14} entre o esforço total e a soma das parcelas, e as equações em forma fechada, Eqs. (66) a (68), coincidiram com o resultado numérico do algoritmo recursivo com diferença máxima também da ordem de 10^{-14} ao longo de toda a trajetória, o que confirma a exatidão da manipulação algébrica apresentada na Seção 4.

Realizou-se, então, a validação pela dinâmica direta descrita na Seção 3.3: os esforços $\boldsymbol{\tau}(t)$ aplicaram-se às Equações (71) a (73), integradas pelo método de Euler, Eq. (19), com passo fixo $h = 1$ ms. A Figura 9 sobrepõe a trajetória reconstruída à trajetória planejada, com concordância visualmente indistinguível nas três coordenadas, e a Tabela 6 quantifica os erros máximos conforme a métrica da Equação (39), em valor absoluto e em percentual do deslocamento total de cada junta. Os erros relativos, de $0{,}045\,\%$ em d_1, $0{,}011\,\%$ em θ_2 e $0{,}035\,\%$ em d_3, todos inferiores a $0{,}05\,\%$, mostram-se compatíveis com a precisão de

primeira ordem do método para o passo adotado e confirmam a coerência entre as dinâmicas inversa e direta.

Figura 9 – Validação pela dinâmica direta: trajetória planejada e trajetória simulada pelo método de Euler.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 – Erro máximo da validação por dinâmica direta (método de Euler, $h = 1$ ms), em valor absoluto e em percentual do deslocamento total da junta.

Coordenada	Erro máximo absoluto	Erro relativo
d_1	$9{,}0 \times 10^{-5}$ m	0,045 %
θ_2	$1{,}7 \times 10^{-4}$ rad	0,011 %
d_3	$7{,}1 \times 10^{-5}$ m	0,035 %

Fonte: Autoria própria.

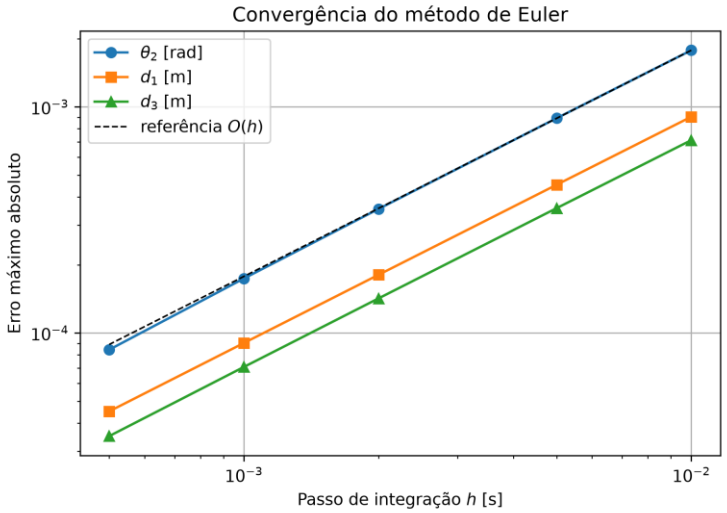
Para a aferição da ordem de convergência do integrador, repetiu-se a simulação com cinco valores de passo, de 10 ms a $0{,}5$ ms. A Tabela 7 e a Figura 10 apresentam os erros máximos resultantes: a cada redução do passo pela metade, o erro reduz-se aproximadamente pela metade, e as curvas alinham-se à referência de inclinação unitária na escala logarítmica, em concordância com o erro global $O(h)$ previsto na Seção 2.6. Esse comportamento confirma a implementação correta do integrador e orienta a escolha do passo em função da precisão requerida.

Tabela 7 – Convergência do método de Euler: erro máximo absoluto em função do passo.

h [ms]	d_1 [m]	θ_2 [rad]	d_3 [m]
10	$9{,}0 \times 10^{-4}$	$1{,}8 \times 10^{-3}$	$7{,}1 \times 10^{-4}$
5	$4{,}5 \times 10^{-4}$	$8{,}9 \times 10^{-4}$	$3{,}6 \times 10^{-4}$
2	$1{,}8 \times 10^{-4}$	$3{,}5 \times 10^{-4}$	$1{,}4 \times 10^{-4}$
1	$9{,}0 \times 10^{-5}$	$1{,}7 \times 10^{-4}$	$7{,}1 \times 10^{-5}$
0,5	$4{,}5 \times 10^{-5}$	$8{,}4 \times 10^{-5}$	$3{,}5 \times 10^{-5}$

Fonte: Autoria própria.

Figura 10 – Convergência do método de Euler em escala logarítmica, com referência de inclinação unitária.



Fonte: Autoria própria.

Avaliou-se, por fim, o efeito da duração da trajetória sobre os esforços máximos, com a repetição da avaliação das equações dinâmicas, Eq. (74), para $T = 2{,}5$ s, $T = 5{,}0$ s e $T = 10{,}0$ s. A Tabela 8 resume os resultados: a força vertical praticamente não se altera, pois a

parcela gravitacional de $53{,}955$ N domina o esforço em qualquer duração; já o torque rotativo e a força radial, dominados por parcelas inerciais e de velocidade, crescem de forma acentuada com a redução de T. A força radial máxima quadruplica quando a duração cai pela metade, em conformidade com a escala $1/T^2$ da aceleração do polinômio cúbico identificada na Seção 4.5. Para durações longas, os termos de atrito viscoso passam a responder por fração crescente do torque rotativo. Essas observações orientam o dimensionamento preliminar de atuadores em função do tempo de ciclo requerido pela aplicação.

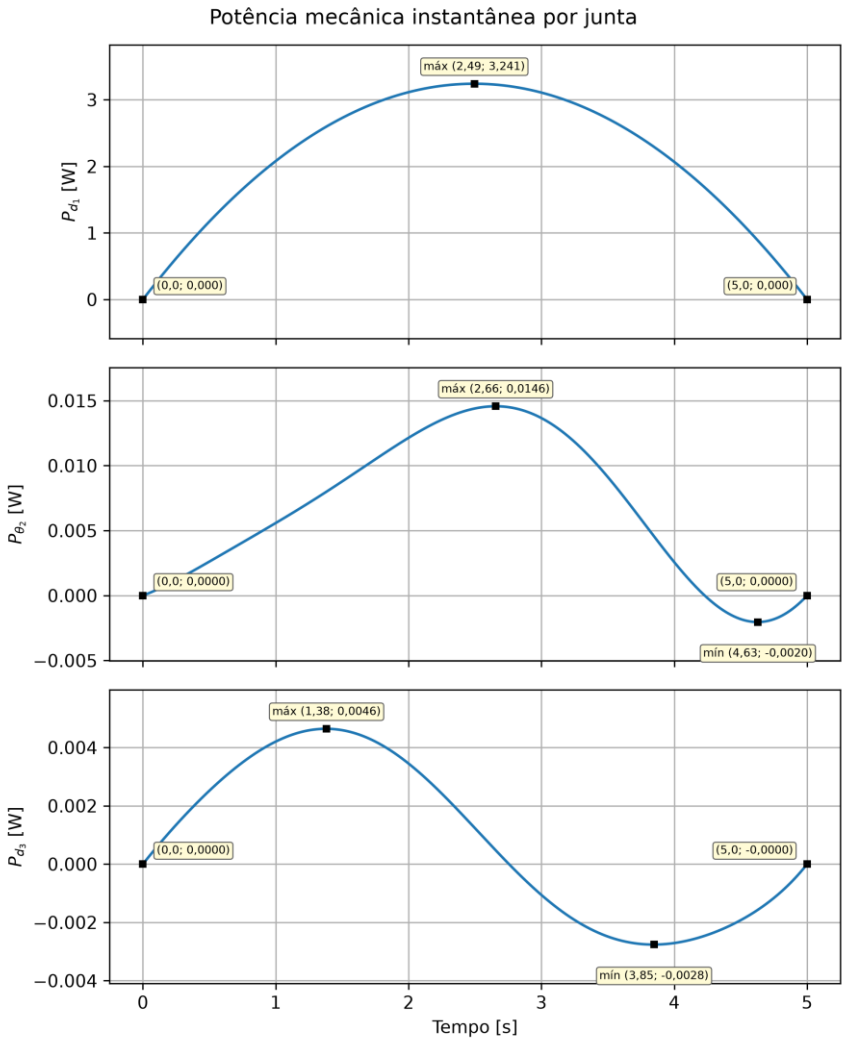
Tabela 8 – Efeito da duração da trajetória sobre os esforços máximos.

T [s]	$\max\|F_{d_1}\|$ [N]	$\max\|\tau_{\theta_2}\|$ [N m]	$\max\|F_{d_3}\|$ [N]
2,5	55,011	0,115	0,480
5,0	54,219	0,031	0,120
10,0	54,021	0,014	0,035

Fonte: Autoria própria.

Complementa-se a análise com a potência mecânica instantânea de cada junta, $P_i = \tau_i \, \dot{q}_i$, apresentada na Figura 11 com marcadores de dados nos pontos inicial, final, máximo e mínimo de cada curva, e com a energia mecânica entregue ao longo do movimento, $E_i = \int_0^T P_i \; dt$, resumida na Tabela 9. A junta vertical concentra a demanda: potência de pico de $3{,}24$ W, no instante de velocidade máxima, e energia de $10{,}80$ J, praticamente igual ao trabalho realizado contra a gravidade, $\Delta E_p = (m_1 + m_2 + m_3)\, g\, \Delta d_1 = 10{,}79$ J. As juntas rotativa e radial demandam potências de pico de apenas $14{,}6$ mW e $4{,}6$ mW, com energias da ordem de milijoules, majoritariamente dissipadas no atrito viscoso. Esses valores delimitam, de forma quantitativa, os requisitos de potência dos atuadores para o ciclo em estudo.

Figura 11 – Potência mecânica instantânea por junta ao longo da trajetória.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 – Potência de pico e energia mecânica por junta na trajetória simulada.

Junta	Potência máxima	Energia
d_1	3,241 W	10,801 J
θ_2	14,6 mW	33,4 mJ
d_3	4,6 mW	3,9 mJ
Total		10,838 J

Fonte: Autoria própria.

Quanto às limitações, os parâmetros físicos adotados constituem aproximações destinadas à simulação. Para aplicação a um manipulador real, recomenda-se identificar experimentalmente os parâmetros dinâmicos (Khalil; Dombre, 2002), incluir carga útil

variável, atrito seco, folgas mecânicas e limites reais de atuação. O modelo obtido fornece, ainda, a base para estratégias de controle em malha fechada, como o controle por torque computado (Slotine; Li, 1991; Asada; Slotine, 1986).

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, desenvolveu-se a modelagem integrada de um manipulador PRP, da cinemática à dinâmica, com simulação computacional em MATLAB. Retomam-se, a seguir, os objetivos específicos definidos na introdução.

Quanto à cinemática, obteve-se a solução direta por transformações homogêneas, Eq. (45), e deduziu-se a solução analítica inversa, Eq. (48); a consistência entre ambas confirmou-se com erro de reconstrução nulo na precisão apresentada. Caracterizou-se a cinemática diferencial pelo Jacobiano da Eq. (52), com determinante $-d_3$ e singularidade restrita ao eixo de rotação, fora da região de operação adotada.

Quanto à trajetória, planejaram-se movimentos suaves por polinômios cúbicos, Eqs. (53) a (55), com velocidades nulas nos extremos e valores máximos analíticos confirmados pela simulação.

Quanto à dinâmica, obtiveram-se, pela aplicação simbólica do algoritmo recursivo de Newton–Euler, as equações do manipulador em forma fechada, Eqs. (66) a (68), e a respectiva forma matricial, Eq. (69), com matriz de massa diagonal e acoplamento restrito aos termos de velocidade. A avaliação numérica dessas equações quantificou os esforços exigidos na trajetória em estudo: força vertical dominada pela gravidade, torque rotativo dependente do raio do centro de massa e força radial com contribuição centrífuga.

Quanto à simulação e à validação, simularam-se as equações em MATLAB e validou-se a implementação em três níveis: consistência interna da decomposição (10^{-14}), coincidência entre as equações fechadas e o algoritmo numérico (10^{-14}) e reconstrução da trajetória pela dinâmica direta, integrada pelo método de Euler com passo de 1 ms, com erro máximo inferior a $0{,}05\,\%$ do deslocamento total de cada junta. O estudo de convergência confirmou o decaimento linear do erro com o passo, em conformidade com a ordem teórica do método, e a análise do efeito da duração da trajetória quantificou a escala $1/T^2$ das parcelas inerciais dos esforços, com a força vertical sempre dominada pela gravidade. A análise de potência e energia quantificou a demanda dos atuadores, concentrada na junta vertical: $3{,}24$ W de pico e $10{,}80$ J por ciclo, essencialmente o trabalho contra a gravidade.

Conclui-se que todos os objetivos propostos se cumpriram. Como trabalhos futuros, destacam-se a construção de um protótipo em escala de bancada com os parâmetros adotados e a respectiva validação experimental, a identificação dos parâmetros inerciais e de atrito, o planejamento de trajetória diretamente no espaço operacional e o projeto de controladores em malha fechada baseados no modelo dinâmico obtido.

REFERÊNCIAS

ASADA, H.; SLOTINE, J.-J. E. *Robot Analysis and Control*. Nova York: John Wiley & Sons, 1986.

BARBOSA, R. F. S.; ROSSINI, F. L.; PONTIM, F. M.; OLIVEIRA, J. M. S.; SOUZA, R. E. Geração de trajetória em um robô manipulador RRR por meio de algoritmo numérico. In: *Anais do XV Seminário de Extensão e Inovação e do XXX Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR*. Campo Mourão: UTFPR, 2025.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. *Métodos Numéricos para Engenharia*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

CORKE, P. *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB*. 2. ed. Cham: Springer, 2017.

CRAIG, J. J. *Robótica*. 3. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

FU, K. S.; GONZALEZ, R. C.; LEE, C. S. G. *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*. Nova York: McGraw-Hill, 1987.

HUDSON ROBOTICS. *PlateCrane EX robotic arm microplate handler*. [S. l.]: Hudson Lab Automation, [s. d.]. Disponível em: https://hudsonlabautomation.com/products/automated-microplate-handlers/platecrane-ex-robotic-arm-microplate-handler/. Acesso em: 16 set. 2026.

KHALIL, W.; DOMBRE, E. *Modeling, Identification and Control of Robots*. Londres: Hermes Penton Science, 2002.

OLIVEIRA, J. M. S.; ROSSINI, F. L.; PONTIM, F. M.; SOUZA, R. E. Cinemática direta de um robô manipulador de três graus de liberdade RRR. In: *Anais do XV Seminário de Extensão e Inovação e do XXX Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR*. Campo Mourão: UTFPR, 2025.

PAUL, R. P. *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control*. Cambridge: MIT Press, 1981.

PONTIM, F. M.; OLIVEIRA, J. M. S.; BARBOSA, R. F. S.; ROSSINI, F. L. Modelagem matemática e análise computacional da cinemática direta em manipuladores RRR de três graus de liberdade. In: *Engenharia: a máquina que constrói o futuro*. São Paulo: Editora Científica Digital, 2026. DOI: 10.37423/260110651.

PONTIM, F. M.; ROSSINI, F. L.; OLIVEIRA, J. M. S. Modelagem cinemática e geração de trajetória do robô manipulador 4 DOF. In: *Anais do XV Seminário de Extensão e Inovação e do XXX Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR*. Campo Mourão: UTFPR, 2025.

PONTIM, F. M.; ROSSINI, F. L.; OLIVEIRA, J. M. S.; ROSSINI, G. P.; SOUZA, R. E. Cinemática inversa em um robô manipulador RRR por meio de algoritmo numérico. In: *Anais do XV Seminário de Extensão e Inovação e do XXX Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR*. Campo Mourão: UTFPR, 2025.

ROSSINI, G. P.; SANTOS, O. A. P.; ROSSINI, F. L. Estudo de caso com modelagem da cinemática direta e inversa analítica do robô ABB IRB e validação via simulação. In: *Tecnologias Emergentes em Engenharia: Convergência entre Automação, Robótica, Metrologia e Energia*. São Paulo: Editora Científica Digital, 2025a. DOI: 10.37885/250619554.

ROSSINI, G. P.; SANTOS, O. A. P.; ROSSINI, F. L. Modelagem da cinemática direta e geração de trajetória do robô manipulador ABB IRB 1010. In: *Anais do XV Seminário de Extensão e Inovação e do XXX Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR*. Campo Mourão: UTFPR, 2025b.

SICILIANO, B.; KHATIB, O. (ed.). *Springer Handbook of Robotics*. 2. ed. Berlim: Springer, 2016.

SICILIANO, B.; SCIAVICCO, L.; VILLANI, L.; ORIOLO, G. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Londres: Springer, 2010.

SLOTINE, J.-J. E.; LI, W. *Applied Nonlinear Control*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1991.

SOUZA, H. S. C.; SANTOS, C. F.; ROSSINI, F. L. Desenvolvimento da cinemática direta do robô FANUC modelo M-410: uma jornada da teoria à simulação. In: *Tópicos Especiais em Engenharia: Inovações e Avanços Tecnológicos 16*. AYA Editora, 2025. DOI: 10.47573/aya.5379.2.465.4.

SPONG, M. W.; HUTCHINSON, S.; VIDYASAGAR, M. *Robot Modeling and Control*. Nova York: John Wiley & Sons, 2006.

CAPÍTULO III

MODELAGEM E ANÁLISE DE CIRCUITO RLC CHAVEADO, SOLUÇÃO POR MEIO DA TRANSFORMADA DE LAPLACE E VALIDAÇÃO VIA COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ANALÍTICOS E COMPUTACIONAIS

MODELING AND ANALYSIS OF A SWITCHED RLC CIRCUIT, SOLUTION USING LAPLACE TRANSFORM AND VALIDATION VIA COMPARISON OF ANALYTICAL AND COMPUTATIONAL RESULTS

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-3

Mayara Hitomi Sassaki Matsucawa [1]
Flávio Luiz Rossini [2]

[1] Graduanda do curso de Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR
[2] Professor do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DALEN) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento da modelagem e análise de um circuito elétrico chaveado composto por resistor, indutor e capacitor (RLC), com o objetivo de validar as formas de onda obtidas por modelos analíticos via comparação com simulações computacionais. O estudo fundamenta-se na análise da resposta do circuito em regimes transitório e estacionário. A metodologia constituiu-se na aquisição das equações diferenciais associadas ao circuito RLC estabelecido, na aplicação da Transformada de Laplace e do Teorema de Cramer para a simplificação dos processos de resolução analítica, e na implementação do modelo nos softwares Simulink® e MATLAB® para a extração das formas de onda. Os resultados numéricos demonstraram sobreposição entre as curvas calculadas e simuladas, o que evidenciou a eficácia do modelo matemático para a descrição das respostas do sistema sob diferentes condições de chaveamento. Obteve-se um erro percentual no eixo de tensão de aproximadamente 0,0004% e, portanto, confirmou-se a fidelidade da integração entre a fundamentação teórica e as ferramentas de simulação, as quais se apresentam como essenciais para ensino, aprendizagem e aplicação em projetos eletrônicos.

Palavras-chave: Modelagem de circuito RLC. Transformada de Laplace. Simulação no MATLAB®. Simulação no Simulink®.

ABSTRACT

This paper presents the development of modeling and analysis of a switched electrical circuit composed of a resistor, inductor, and capacitor (RLC), aiming to validate the waveforms obtained through analytical models by comparing them with computational simulations. The study is based on analyzing the circuit response in both transient and steady-state regimes. The methodology consisted of acquiring the differential equations associated with the established RLC circuit, applying the Laplace Transform and Cramer's Rule to simplify analytical resolution processes, and implementing the model in Simulink® and MATLAB® software to extract the waveforms. Numerical results demonstrated an overlap between calculated and simulated curves, highlighting the effectiveness of the mathematical model in describing system responses under different switching conditions. A percentage error of approximately 0.0004% was obtained on the voltage axis, thus confirming the fidelity of the integration between theoretical foundation and simulation tools, which prove to be essential for teaching, learning, and application in electronic projects.

Keywords: RLC circuit Modeling. Laplace Transform. MATLAB® simulation. Simulink® simulation.

1. INTRODUÇÃO

A Modelagem de Sistemas Físicos consiste na descrição e análise do comportamento dos sistemas reais por meio de teorias e fundamentos matemáticos. Na Engenharia Eletrônica, as ferramentas amplamente utilizadas estão relacionadas às leis que regem os fenômenos elétricos além do conjunto de métodos para a solução de equações diferenciais. No caso em que as equações diferenciais sejam lineares, aplica-se a Transformada de Laplace, a qual possibilita a solução e obtenção de respostas no domínio do tempo ou da frequência. Dessa forma, pode-se observar e compreender as interações entre os fenômenos que ocorrem nos componentes e as suas consequências no comportamento do circuito (SADIKU, 2013).

Para a análise dos componentes eletrônicos passivos usuais na eletrônica, destacam-se o capacitor, o indutor e o resistor. Os componentes capacitor e indutor são armazenadores de energia de modo que o primeiro acumula energia em forma de campo elétrico e o segundo em forma de campo magnético (BOYLESTAD, 2019). Os efeitos desses dois componentes possuem grande importância no comportamento de um sistema eletrônico e, quando combinados ao resistor, configuram o circuito RLC (Resistores, Indutores e Capacitores). Uma das principais aplicações desta estrutura ocorre em sistemas de sintonia e filtragem de frequências em telecomunicação, os quais atuam no bloqueio de ruídos indesejados e na seleção exclusiva dos sinais específicos (SADIKU, 2013).

Em meio de análise de circuitos e respostas em frequência, a compreensão das equações de segunda ordem se faz indispensável para o dimensionamento de filtros passivos e redes de acoplamento (HAYT; DURBIN, 2014). Aplicam-se amplamente os modelos matemáticos de sistemas de segunda ordem em abordagens nas áreas técnicas, especialmente em contextos que envolvem controle de atuadores e processamento de energia. Conforme apresentado por Rossini (2024), destaca-se a modelagem de circuitos RLC em sistemas dinâmicos aplicados no desenvolvimento de controladores de alto desempenho, utilizados tanto em sistemas de potências (JUNIOR; ALCANTARA; ROSSINI, 2023) (FERREIRA; ROSSINI; NANNI; BROLIN, 2025) quanto em robótica industrial e automação (PONTIM; OLIVEIRA; ROSSINI, 2025).

Dentre as aplicações complexas, observa-se o uso desses fundamentos no projeto de interfaces para robôs, os quais têm como objetivos centrais, o estudo de trajetória do efetuador e a estabilidade do sistema (OGATA, 2010) (PONTIM; OLIVEIRA; ROSSINI, 2025)

(JUNIOR; ALCANTARA; ROSSINI, 2023) (FERREIRA; ROSSINI; NANNI; BROLIN, 2025). As ferramentas de modelagem constituem as fundamentações dos estudos em todas as etapas de desenvolvimento do sistema eletrônico, razão pela qual se torna essencial a validação dos modelos analíticos por meio de ferramentas de simulação como MATLAB® e Simulink®.

Neste artigo, apresenta-se o desenvolvimento completo da modelagem de um circuito elétrico RLC chaveado, o qual se inicia com a obtenção das equações diferenciais no domínio do tempo e desenvolve-se até a solução analítica pela aplicação da Transformada de Laplace (YOSHIDA; NASCIMENTO; PROENÇA; ROSSINI, 2024) (AMARO; BEZERRA; ROSSINI, 2023). O objetivo consiste na análise do regime transiente sob condições de chaveamento distintas em determinados intervalos de tempo de funcionamento $(1s \leq t < 40set \geq 40s)$, com a comparação entre os resultados calculados analiticamente e os dados extraídos mediante simulações computacionais (SILVA; ANDRADE; ROSSINI, 2023).

Ao longo deste trabalho, serão abordados: a fundamentação do projeto com as principais conceitos e desenvolvimentos matemáticos, os quais detalham o processo e resolução matemática de acordo com a análise de circuito; a descrição do *Script* implementado para realizar a simulação; e a sintetização dos resultados obtidos de acordo com os objetivos propostos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os processos para a dedução dos resultados analíticos do circuito RLC fundamentam-se nas ferramentas matemáticas e nos conceitos da engenharia eletrônica descritos a seguir.

2.1. LEI DE KIRCHHOFF DAS TENSÕES (LKT)

A Lei de Kirchhoff para Tensão fundamenta-se no princípio da conservação da energia, a qual estabelece que o somatório das tensões ao longo de uma malha fechada é nulo (SADIKU, 2013). Esta lei é expressa por:

$$\sum_{k=1}^{n} v_k = 0 \tag{1}$$

2.2. TRANSFORMADA DE LAPLACE

A Transformada de Laplace consiste em uma ferramenta matemática que executa a transformação de uma função $f(t)$ no domínio do tempo para o domínio da frequência complexa, com a obtenção da função $F(s)$:

$$L\{f(t)\} = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t)dt \tag{2}$$

2.3. REGRA DE CRAMER

Aplica-se esta regra em sistemas de equações lineares nos quais o número de equações é igual ao número de incógnitas . A estrutura matricial é dada por $AX = B$ e obtêm-se as incógnitas da forma (BOLDRINI, J. L. 1980).

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$x_n = \frac{det(A_n)}{det(A)} \tag{4}$$

2.4. FRAÇÕES PARCIAIS E TRANSFORMADA INVERSA DE LAPLACE

Quando a resposta no domínio da frequência s apresenta um quociente de polinômios $P\,(s)/Q\,(s)$, utiliza-se a decomposição em frações parciais para a simplificação da expressão antes da aplicação da Transformada Inversa de Laplace, Equação (4).

$$L^{-1}\{F(s)\} = f(t) \tag{5}$$

2.5. CONVERSÃO RETANGULAR-POLAR E IDENTIDADE DE EULER

Números complexos na forma $z = a + jb$ passam pela conversão para a forma polar $|z|\angle\theta$, Eqs. (6) e (7).

$$|z| = \sqrt{a^2 + b^2} \tag{6}$$

$$\theta = tan^{-1}\frac{b}{a} \tag{7}$$

Emprega-se a Identidade de Euler, Eq. (8), para expressar os termos exponenciais complexos em termos de funções senoidais amortecidas no tempo real.

$$e^{j\theta} = cos(\theta) + jsen(\theta) \tag{8}$$

2.6. TEOREMA DO VALOR FINAL (TVF)

O Teorema do Valor Final determina o valor estacionário (regime permanente) de uma função no domínio do tempo a partir de sua representação Laplaciana:

$$\lim_{t\to\infty} f\,(t) = \lim_{s\to 0} s\,F(s) \tag{9}$$

Tabela 1 – Notações e unidades utilizadas

Notações	Significados
V	Unidade de medida da tensão, dada em Volts
A	Unidade de medida da corrente, dada em Ampere
R	Resistor, dado em Ohms (Ω)
L	Indutor, dado em Henry (H)
C	Capacitor, dado em Farad (F)
t	Representação no tempo, dado em Segundos
s	Representação em fase
D	Representação resumida da expressão da derivada $\frac{d}{dt}$
v	Representação da tensão no tempo; equivalente à v(t)
i	Representação da corrente no tempo; equivalente à i(t)
$V(s)$	Representação da tensão em fase
$I(s)$	Representação da corrente em fase
Δ	Representação alternada para o determinante (det)

Fonte: Autoria própria.

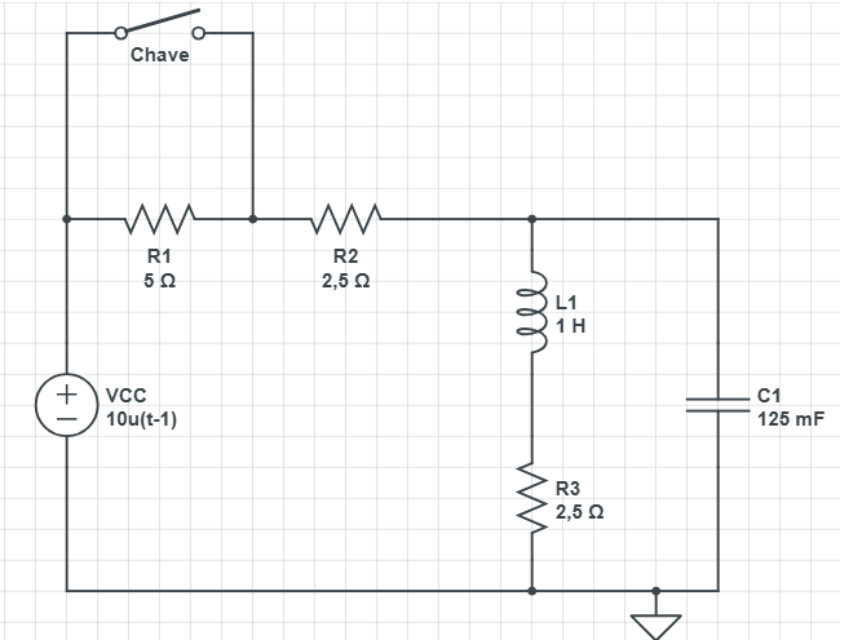
3. METODOLOGIA E MEMORIAL DE CÁLCULO

Nesta seção, apresentam-se todos os procedimentos executados para a dedução dos valores analíticos que representaram o comportamento do circuito em regime permanente e transitório, de acordo com os respectivos intervalos de tempo de chaveamento. As deduções matemáticas dividem-se em duas etapas: 1º – Circuito com chave aberta (intervalo: $1s \leq t < 40s$); 2º – Circuito com chave fechada (intervalo: $t \geq 40s$).

O circuito analisado é composto por uma fonte de tensão contínua $V_{CC} = 10u(t-1)V$, três resistores ($R_1 = 5\Omega, R_2 = 2{,}5\Omega e R_3 = 2{,}5\Omega$), um indutor $L_1 = 1H$ e um capacitor $C_1 = 125mF$. Uma chave é acionada em $t = 40s$ para curto-circuitar o resistor R_1.

3.1. ETAPA 1: DESCRIÇÃO MATEMÁTICA COM CHAVE ABERTA ($1s \leq t < 40s$)

Figura 1: Circuito RLC proposto para analisar – Estado da chave aberta



Fonte: Autoria própria.

Com a chave aberta, a corrente circula por R_1 e R_2. Aplica-se a LKT para a estruturação equacional, Eq. (11).

$$\begin{cases} v_{R1} + v_{R2} + v_L + v_{R3} = v_{CC} \\ v_c + v_{R3} + v_L = 0 \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} \left(R_1 + R_2 + L\left(\frac{d}{dt}\right) + R_3\right) i_1 - \left(R_3 + L\left(\frac{d}{dt}\right)\right) i_2 = v_{CC} \\ R_3 + L\left(\frac{d}{dt}\right) i_1 + \left(R_3 + L\left(\frac{d}{dt}\right) + \frac{1}{C}\left(\frac{1}{\frac{d}{dt}}\right)\right) i_2 + v_C(0) = 0 \end{cases} \tag{11}$$

Utiliza-se a Transformada de Laplace para as malhas 1 e 2 da Eq. (10) e obtém-se o sistema matricial da Eq. (13).

$$\begin{cases} 10I_1(s) + [sI_1(s) - i_1(0)] - 2{,}5I_2(s) - [sI_2(s) - i_2(0)] = \frac{10}{s} \\ -2{,}5I_1(s) - [sI_1(s) - i_1(0)] + 2{,}5I_2(s) + [sI_2(s) - i_2(0)] + \frac{8I_2(s)}{s} + \frac{V_C(0)}{s} = \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{bmatrix} s + 10 - s - 2{,}5 \\ -s - 2{,}5s + 2{,}5 + \frac{8}{s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{10}{s} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{13}$$

A resolução do sistema pela Regra de Cramer em combinação com a aplicação da operação Mínimo Múltiplo Comum resulta no determinante da matriz principal:

$$\Delta = \frac{7{,}5s^2 + 80 + 26{,}75s}{s} \tag{14}$$

De modo semelhante, efetua-se as deduções matemáticas para os determinantes das correntes $I_1(s)$ e $I_2(s)$ e, por meio da divisão pela Eq. (14), obtêm-se os resultados respectivos para cada corrente no domínio de Laplace.

$$I_1(s) = \frac{\Delta I_1(s)}{\Delta} = \frac{1{,}33s^2 + 3{,}33s + 10{,}67}{s(s^2 + 3{,}57s + 10{,}67)} \tag{15}$$

$$I_2(s) = \frac{\Delta I_2(s)}{\Delta} = \frac{1{,}33s + 3{,}33}{s^2 + 3{,}57s + 10.67} \tag{16}$$

Calculam-se as raízes do denominador, as quais são complexas conjugadas: $s_{1,2} = -1{,}785 \pm j2{,}735$. Ao aplicar o método de Frações Parciais, obtêm-se as seguintes relações, nas quais se representa as raízes complexas conjugadas de forma resumida por K e $\bar{K}$:

$$I_1(s) = \frac{\frac{10{,}67}{K\bar{K}}}{s} + \frac{\frac{1{,}33K^2 + 3{,}33K + 10{,}67}{K^2 - K\bar{K}}}{s - K} + \frac{\frac{1{,}33\bar{K}^2 + 3{,}33\bar{K} + 10{,}67}{\bar{K}^2 - \bar{K}K}}{s - \bar{K}} \tag{16}$$

$$I_2(s) = \frac{\frac{1{,}33K + 3{,}33}{K - \bar{K}}}{s - K} + \frac{\frac{1{,}33\bar{K} + 3{,}33}{\bar{K} - K}}{s - \bar{K}} \tag{17}$$

Após a decomposição em frações parciais e a aplicação da Transformada Inversa de Laplace, obtêm-se as expressões analíticas das correntes no capacitor:

$$i_1(t) = 1u(t) + \left(0{,}44e^{(-1{,}785t)}\right)cos(2{,}735t + 0{,}745)A \tag{18}$$

$$i_2(t) = 1{,}38e^{(-1{,}785t)}cos(2{,}735t - 14{,}785°)A \tag{19}$$

Ao aplicar o TVF nas Eqs. (18) e (19), nota-se que ambas as correntes resultam-se em $1A$ e $0A$, respectivamente. Logo, por meio de i_2 evidencia-se o comportamento de um capacitor em um regime permanente com corrente contínua (DC), o qual assemelha-se a um circuito aberto.

Deduz-se a tensão no capacitor no domínio do tempo por meio da corrente $I_2(s)$, a qual flui pelo componente em análise. Aplica-se a Transformada de Laplace e obtém-se:

$$V_C(s) = \frac{I_2(s)}{Cs} + \frac{V_C(0)}{s} \tag{20}$$

Faz-se o uso da fração parcial para a simplificação da Eq. (20) e, mediante a aplicação da Transformada Inversa de Laplace, obtêm-se a expressão da tensão no capacitor:

$$v_c(t) = 2{,}5u(t) + \left(3{,}38e^{(-1{,}785t)}\right)cos(2{,}735t + 3{,}88)V \tag{21}$$

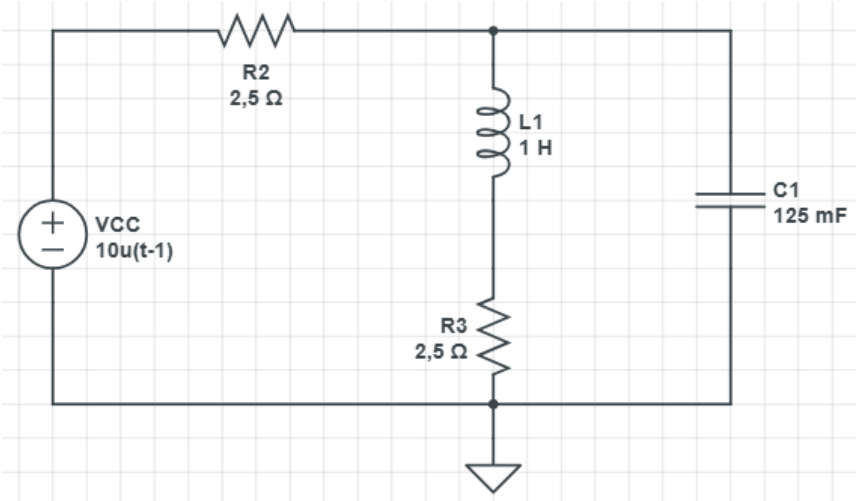
Pela aplicação do TVF, identifica-se que a tensão no capacitor em regime permanente para esta etapa:

$$\lim_{t\to\infty} v_c\,(t) = \lim_{s\to 0} s \cdot V_C(s) = 2{,}5V \tag{22}$$

3.2. ETAPA 2: DESCRIÇÃO MATEMÁTICA COM CHAVE FECHADA ($40s \leq t$)

Ao fechar a chave em $t = 40s$, omite-se o resistor R_1 do circuito. As condições iniciais estabelecidas pelo regime permanente da primeira etapa são $v_C(40) = 2{,}5V$ e $i_1(40) = 1A$.

Figura 2: Circuito RLC proposto para analisar – Estado da chave fechada



Fonte: Autoria própria.

Por meio da análise do circuito, deduz-se as equações das malhas conforme mostra-se a seguir:

$$\begin{cases} v_{R2} + v_L + v_{R3} = v_{CC} \\ v_c + v_{R3} + v_L = 0 \end{cases} \tag{23}$$

$$\begin{cases} R_2 i_2 + L\left(\dfrac{d(i_1 - i_2)}{dt}\right) + R_3(i_1 - i_2) = v_{CC} \\ \dfrac{1}{C}\left(\displaystyle\int_1^t i_2\, d\tau + v_C(40)\right) + R_3(i_2 - i_1) + L\left(\dfrac{d(i_2 - i_1)}{dt}\right) = 0 \end{cases} \tag{24}$$

O sistema no domínio de Laplace com condições iniciais resulta no seguinte sistema matricial:

$$\begin{bmatrix} s + 5 - s - 2{,}5 \\ -s - 2{,}5s + 2{,}5 + \dfrac{8}{s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{10 + s}{s} \\ \dfrac{-2{,}5 - s}{-s} \end{bmatrix} \tag{25}$$

Identifica-se as raízes deste sistema, cujos valores são complexos conjugados dados por $s_{1,2} = -2{,}85 \pm j2{,}81$ e, por meio das manipulações matemáticas com frações parciais e Transformada Inversa de Laplace, deduzem-se as seguintes resoluções:

$$i_1(t) = 2u(t) + \left(1{.}6e^{(-2{,}85t)}\right)cos(2{,}81t + 0{,}899)A \tag{26}$$

$$i_2(t) = \left(2{,}014e^{(-2{,}85t)}\right)cos(2{,}81t + 0{,}124)A \tag{27}$$

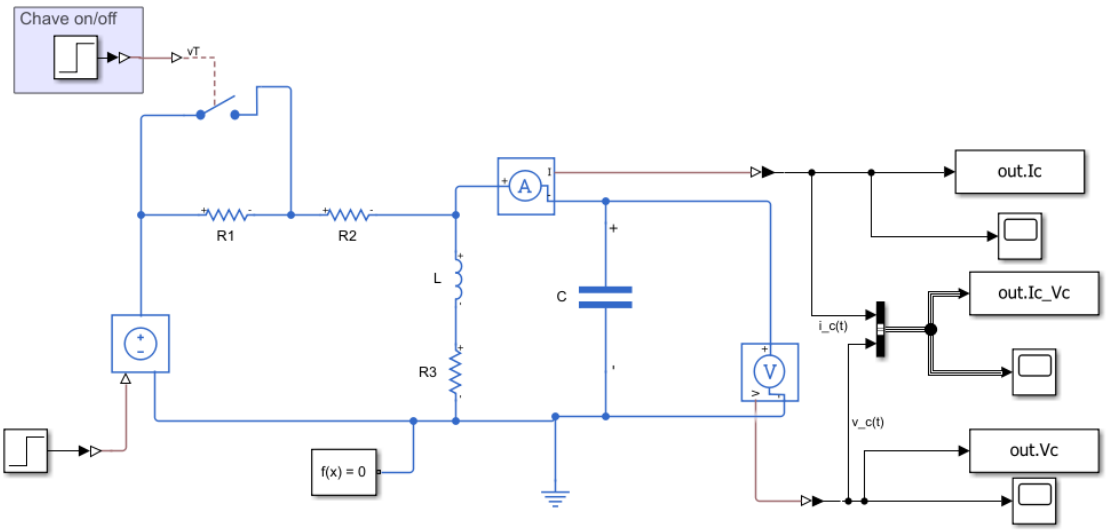
$$v_c(t) = 5u(t) + 4{,}02e^{(-2{,}85t)}cos(2{,}81t + 4{,}05)V \tag{28}$$

Pelo TVF, a corrente i_1 e tensão final do capacitor eleva-se para $2A$ e $5V$, respectivamente, enquanto i_2 permanece nulo. Deste modo, confirma-se sobre o comportamento do capacitor em um circuito em regime permanente.

4. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E SIMULAÇÃO

Validaram-se os modelos matemáticos desenvolvidos por meio da implementação dos *scripts* no ambiente MATLAB® e simulação do circuito no *software* Simulink®. Ao considerar a fonte de alimentação com o valor de $V_{CC} = 10u(t - 1)$, fez-se necessário o deslocamento temporal dentro do MATLAB®e o ajuste das configurações de passos no Simulink®

Figura 3: Circuito RLC implementado no Simulink®



Fonte: Autoria própria.

Desenvolveu-se o *script* para a implementação do gráfico de sobreposição de linhas com a finalidade de extrair o resultado gerado pela simulação no Simulink® e comparar com a solução analítica desenvolvida na Seção III.

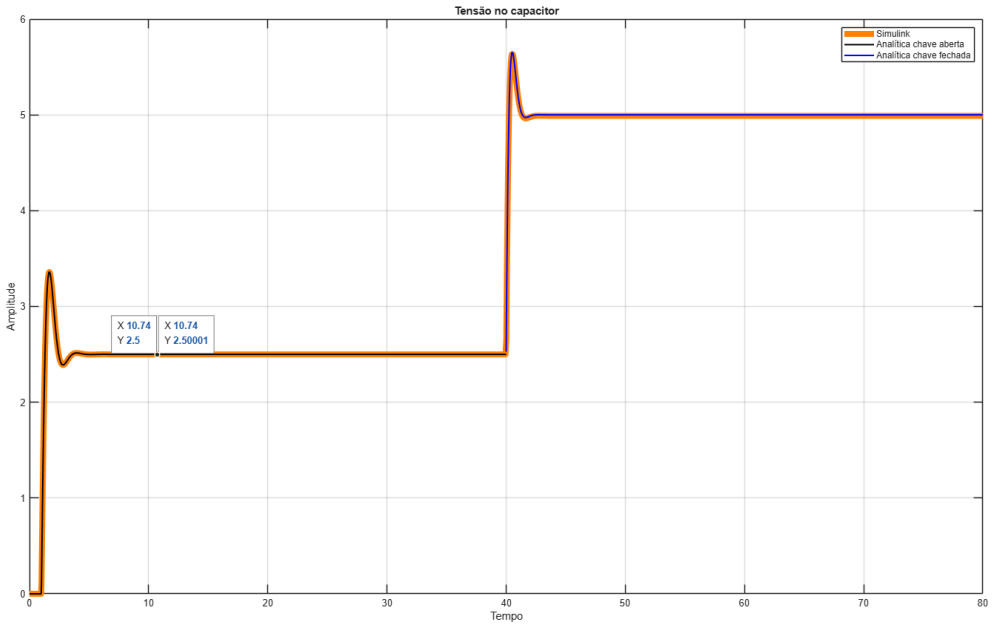
```
V = out.Vc;

t = out.tout;

% Equação da tensão no capacitor no domínio do tempo
%(Intervalo: 1s ≤ t < 40s)
vc0 = 2.5 + 3.38.*exp(-1.785.*t).*cos(2.735.*t + 3.88);

% Deslocamento temporal
t0 = t(1:4000, 1);
vc0_des = [zeros(100, 1); vc0(1:3900, 1)];

figure(1);
plot(t, V, 'Color', [1 0.5 0], 'LineWidth', 6)
hold on;
```

```
title('Tensão no capacitor');
xlabel('Tempo')
ylabel('Amplitude')
grid on

plot(t0, vc0_des, 'k', 'LineWidth', 1.5)

% Equação da tensão no capacitor no domínio do tempo
% (Intervalo: 40s ≤ t)
vcf = 5 + 4.02.*exp(-2.85.*t0).*cos(2.81.*t0 + 4.05);

% Deslocamento temporal
tf = (40:0.01:79.99)';

plot(tf, vcf, 'b', 'LineWidth', 1.5)
set(gcf, 'Color', [1 1 1])
whos vc0 V t t0 vc0_des vcf tf
Name Size Bytes Class Attributes

% Para conferir tamanhos dos vetores
V 8001x1 64008 double
t 8001x1 64008 double
t0 4000x1 32000 double
tf 4000x1 32000 double
vc0 8001x1 64008 double
vc0_des 4000x1 32000 double
vcf 4000x1 32000 double

legend('Simulink', 'Analítica chave aberta', 'Analítica chave fechada')
```

5. RESULTADOS

Ao implementar o código, obtiveram-se as respostas ilustradas na Figura 4, a qual compõe-se pela curva resultante da simulação via Simulink® e pelas curvas resultantes decorrente da aplicação dos valores obtidos por meio da dedução analítica. No intervalo de $1s \leq t < 40s$, o sistema exibiu comportamento com estabilização em $2{,}5V$. Após o fechamento da chave em $t = 40s$, ocorreu um novo surto transitório, o qual convergiu para os novos regimes permanentes de $5V$. Os picos gerados em instantes específicos do chaveamento justificam-se pela presença das raízes complexas, conforme apresentadas na Seção III.

Figura 4: Gráfico de sobreposição constituído a partir da simulação da Figura 3 e pelos resultados analíticos obtidos na Seção III, Eqs. (21) e (28).



Fonte: Autoria própria.

Apesar de ambos os gráficos apresentarem comportamentos similares, observou-se uma pequena discrepância entre as curvas simuladas e as calculadas teoricamente. Essa diferença foi identificada qualitativa e quantitativamente por meio das etiquetas de dados inseridas na Figura 4, as quais exibem os valores exatos associados ao tempo (eixo x) e à amplitude (eixo y) no determinado ponto analisado. Para uma dedução matemática de erro percentual, aplicou-se na equação seguinte os valores do eixo y :

$$\mathrm{E}_{\%.} = \left|\frac{V_{\text{calculado}} - V_{\text{simulado}}}{V_{\text{calculado}}}\right| \times 100\% = \left|\frac{2{,}5 - 2{,}50001}{2{,}5}\right| \times 100\% = 0{,}0004\% \qquad (29)$$

Diante do erro percentual obtido, pôde-se afirmar a exatidão da modelagem matemática e a adequação do uso da Transformada de Laplace em circuitos chaveados.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste estudo de modelagem de sistemas físicos de um circuito RLC permitiu consolidar os conhecimentos teóricos adquiridos ao longo das aulas, por meio da aplicação das leis fundamentais da engenharia elétrica e de ferramentas matemáticas como a Análise de Circuitos, a Transformada de Laplace e a Regra de Cramer. Pela dedução analítica revelou-se o comportamento dinâmico do capacitor, com destaque para a sua propriedade física de armazenamento de energia em campo elétrico. A incorporação rigorosa das condições iniciais na transição de chaveamento em $t = 40s$ — instante em que a tensão prévia de $2{,}5V$ atuou como condição inicial para a segunda etapa — permitiu prever com exatidão a resposta transiente e o novo estado de equilíbrio. Ademais, confirmou-se a característica do capacitor de comportar-se como um circuito aberto em regime permanente, condição evidenciada pela aplicação do Teorema do Valor Final, no qual a corrente no componente resultou em zero.

A comparação entre as equações teóricas obtidas no memorial de cálculo e as simulações computacionais nos softwares MATLAB® e Simulink® demonstrou uma sobreposição de alta exatidão por meio da implementação gráfica dos resultados. A precisão do modelo matemático refletiu-se em um erro percentual relativo desprezível, de aproximadamente $0{,}0004\%$. Essa convergência valida a integração entre a teoria da engenharia e os ambientes de simulação, o que comprova a capacidade dos métodos analíticos para espelhar os fenômenos físicos. Portanto, este tipo de estudo reafirma-se como essencial tanto para o processo de ensino e aprendizagem quanto para elaborar projetos reais avançados.

REFERÊNCIAS

ROSSINI, F. L. **Perfil de pesquisa e publicações científicas**. ResearchGate, 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Flavio-Rossini . Acesso em: 05 de jun. 2026.

BOYLESTAD, R. L. **Introdução à Análise de Circuitos**. 13. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2019. Acesso em: 28 de jun. 2026.

HAYT JR., W. H.; KEMMERLY, J. E.; DURBIN, S. M. **Análise de Circuitos em Engenharia**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. Acesso em: 28 de jun. 2026.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. Acesso em: 28 de jun. 2026.

SADIKU, M. N. O.; ALEXANDER, C. K. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. Acesso em: 28 de jun. 2026.

FERREIRA, L. A.; ROSSINI, F. L.; NANNI, M.; BROLIN, L. C.; **Projeto, Simulação e Análise de um Controlador Pid Aplicado a um Drone Terrestre de Duas Rodas com Acionamento Diferencial. 2025**. ResearchGate, 2025.. Acesso em: 07 de jul. 2026

PONTIM, F. M.; OLIVEIRA, J. M. S.; ROSSINI, F. L. **Modelagem da Cinemática Direta de Robô com Quatro Graus de Liberdade e Simulação no Software MATLAB® via Robotics Toolbox**. ResearchGate, 2025. Acesso em: 21 de set. 2026.

JUNIOR, P. R. M. S.; ALCANTARA, C. V. B.; ROSSINI, F. L.; **Modelagem Dinâmica e Simulação do Sistema de Controle Não Linear do Robô Manipulador SCARA RH-3FRHR35 com Fixação Superior, Fabricante Mitsubishi**. ResearchGate, 2023. Acesso em: 21 de set. 2026.

YOSHIDA, A. G. N.; NASCIMENTO, E. V. V.; PROENÇA, G. S.; ROSSINI, F. L. **Modelagem, Simulação e Análise de Circuito Elétrico RLC Paralelo por Meio da Transformada de Laplace a Partir dos Softwares MATLAB® e LTSPICE®**. ResearchGate, 2024. Acesso em: 22 de set. 2026.

AMARO, O.; BEZERRA, M. S.; ROSSINI, F. L. **Modelagem no Domínio do Tempo, Solução via Transformada de Laplace e Análise das Formas de Onda de Circuito Elétrico RLC Chaveado**. ResearchGate, 2023. Acesso em: 22 de set. 2026.

SILVA, L. E. C; ANDRADE, P. A.; ROSSINI, F. L. **Análise de circuito elétrico RLC de três malhas via transformada de Laplace com softwares MATLAB® e LTSPICE®**. ResearchGate, 2023. Acesso em: 22 de set. 2026.

CAPÍTULO IV

DESENVOLVIMENTO DE UMA APLICAÇÃO WEB PARA A IDENTIFICAÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM EDIFICAÇÕES COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

DEVELOPMENT OF A WEB APPLICATION FOR IDENTIFYING PATHOLOGICAL MANIFESTATIONS IN BUILDINGS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-4

João Constantino Pontes Barreto [1]
Jair Henrique dos Passos Velozo [2]
Everson Silva de Albuquerque [3]
Allefy Teles Sampaio [4]
Livia Campos Lins [5]
Eliana Cristina Barreto Monteiro [6]

[1] Graduando do curso em Ciência da Computação. Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP. https://orcid.org/0009-0005-7672-5379.
[2] Mestrando do curso de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP. https://orcid.org/0009-0003-4253-1045.
[3] Mestrando do curso de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade de Pernambuco – UPE. https://orcid.org/0009-0004-9384-9552.
[4] Mestrando do curso de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade de Pernambuco – UPE. https://orcid.org/[inserir ORCID].
[5] Mestranda do curso de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade de Pernambuco – UPE. https://orcid.org/[inserir ORCID].
[6] Professora Adjunta. Universidade Católica de Pernambuco e Universidade de Pernambuco – UNICAP / UPE. https://orcid.org/0000-0003-0842-779X.

RESUMO

As manifestações patológicas em edificações, como fissuras, processos corrosivos, umidade, crescimento biológico e presença de vegetação, podem comprometer o desempenho e a vida útil das construções e, portanto, exigem métodos técnicos eficientes para sua identificação. Esta pesquisa avaliou o desempenho do modelo multimodal pré-treinado Google Gemini 2.5 Flash na identificação e na classificação dessas manifestações a partir de imagens reais de fachadas. Para viabilizar sua aplicação prática, desenvolveu-se uma aplicação web integrada à API do modelo, que permite o envio de imagens e a geração automática de relatórios técnicos contendo as anomalias detectadas, suas classificações e justificativas descritivas fundamentadas em atributos visuais, como a morfologia das fissuras, os padrões de umidade, os indícios de corrosão e as lesões superficiais. O sistema opera sem treinamento supervisionado adicional ou pré-processamentos complexos, preservando as condições originais das imagens e reproduzindo cenários reais de inspeção predial. Os resultados demonstraram estabilidade das respostas, reconhecimento simultâneo de múltiplas manifestações patológicas e coerência técnica das justificativas. Esses achados evidenciam o potencial dos modelos multimodais integrados a plataformas web como ferramentas de apoio à inspeção e à análise preliminar em engenharia diagnóstica. A pesquisa anterior, baseada em redes neurais convolucionais, é mencionada apenas como referência comparativa para a contextualização metodológica.

Palavras-chave: manifestações patológicas; inteligência artificial; aplicação web; inspeção predial; diagnóstico automatizado.

ABSTRACT

Pathological manifestations in buildings, such as cracks, corrosion, moisture, biological growth, and vegetation, can compromise structural performance and service life and therefore require efficient technical identification methods. This study evaluated the performance of the pre-trained multimodal model Google Gemini 2.5 Flash in identifying and classifying such manifestations in real façade images. To enable its practical application, a web application integrated with the model API was developed, allowing users to upload images and automatically generate technical reports containing the detected anomalies, their classifications, and descriptive justifications based on visual attributes, including crack morphology, moisture patterns, signs of corrosion, and surface deterioration. The system operates without additional supervised training or complex preprocessing, thereby preserving the original image conditions and reproducing real-world building-inspection scenarios. The results showed stable responses, simultaneous recognition of multiple pathological manifestations, and technically consistent justifications. These findings highlight the potential of multimodal models integrated into web platforms as support tools for inspection and preliminary analysis in building diagnostics. Previous research based on convolutional neural networks is mentioned solely as a comparative reference for methodological contextualization.

Keywords: pathological manifestations; artificial intelligence; web application; building inspection; automated diagnosis.

1. INTRODUÇÃO

As manifestações patológicas em edificações, como fissuras, corrosão, bolor, umidade e presença de vegetação, representam desafios recorrentes para a engenharia civil e podem comprometer a durabilidade, a segurança e o desempenho das estruturas quando não são identificadas e tratadas precocemente (Silva; Costa, 2022; Barros; Silva, 2024).

Apesar dos avanços obtidos, os resultados evidenciaram limitações importantes relacionadas à capacidade de generalização da rede neural, fortemente influenciada pelo tamanho reduzido do conjunto de dados e pela necessidade de padronização rigorosa das imagens. Conforme discutido por Carvalho et al. (2025) e Ludermir (2021), modelos de aprendizado profundo treinados com bases limitadas tendem a apresentar instabilidade e dificuldades quando aplicados a cenários reais e a dados não utilizados durante o treinamento.

Diante desse contexto, esta pesquisa propõe uma mudança metodológica relevante: a substituição do treinamento de um modelo específico pelo uso de uma inteligência artificial multimodal pré-treinada disponível no mercado, o Google Gemini 2.5 Flash. Busca-se, assim, avaliar seu potencial como ferramenta de apoio ao diagnóstico de manifestações patológicas em edificações.

A pesquisa apresenta uma evolução metodológica por meio da utilização de modelos multimodais pré-treinados. Esses modelos são construídos com base em arquiteturas modernas de aprendizado profundo, amplamente utilizadas em sistemas fundacionais, como

as derivadas do paradigma Transformer (Vaswani et al., 2017), o que contribui para uma maior capacidade de generalização e robustez em diferentes cenários.

Para tanto, utilizou-se o modelo Google Gemini 2.5 Flash, desenvolvido pela Google, capaz de interpretar imagens e gerar respostas estruturadas com base em evidências visuais. Paralelamente, desenvolveu-se um sistema computacional completo, com React no front-end, TypeScript no back-end e Supabase como solução de banco de dados, o que permitiu a aplicação prática da inteligência artificial em um fluxo real de análise.

2. CONSTRUÇÃO DA APLICAÇÃO WEB

No escopo geral do projeto, o objetivo consiste em desenvolver uma solução de inteligência artificial capaz de auxiliar o processo de diagnóstico e de tratamento de manifestações patológicas em edificações, com base na anamnese. Entre os objetivos específicos, estão utilizar e/ou desenvolver um modelo de inteligência artificial voltado à tomada de decisão, prepará-lo para realizar a anamnese de forma estruturada e, posteriormente, capacitá-lo a diagnosticar as manifestações patológicas a partir das informações coletadas nessa etapa. Na fase descrita neste artigo, a investigação concentrou-se na identificação e na classificação de manifestações patológicas com base em imagens.

2.1. CONJUNTO DE DADOS (DATASET)

A presente pesquisa foi desenvolvida a partir da análise de imagens reais de fachadas e de elementos construtivos que apresentavam manifestações patológicas. As imagens pertencem ao mesmo domínio empírico investigado em estudo anterior, o que possibilitou a comparação entre a abordagem baseada em redes neurais convolucionais e a estratégia adotada nesta fase (Velozo et al., 2025).

Segundo Freitas (2023, p. 1), “um dataset, literalmente, é um conjunto (set) de dados (data). Dados são elementos que, organizados (ou distribuídos) de uma(s) certa(s) maneira(s), isto é, tratados, produzem informação”.

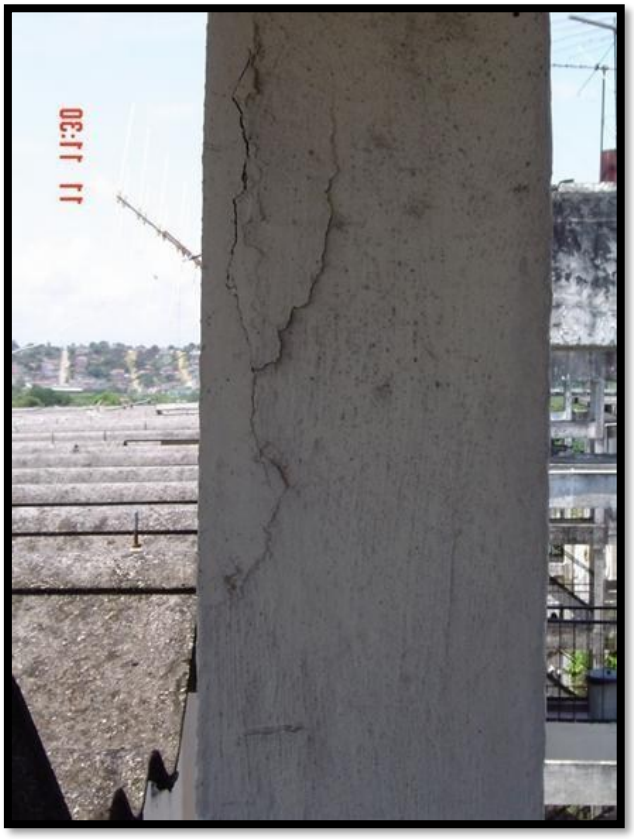
Diferentemente da etapa precedente, na qual se realizou o treinamento supervisionado de redes neurais com um conjunto de dados específico e rotulado, nesta fase optou-se pela utilização de um modelo multimodal pré-treinado em larga escala, o Google Gemini 2.5 Flash. O objetivo foi avaliar a capacidade de generalização de um modelo fundacional sem treinamento adicional com dados específicos da pesquisa.

As imagens foram submetidas individualmente ao modelo, sem a aplicação de pré-processamentos adicionais além daqueles decorrentes da própria captura, de modo a preservar variações reais de iluminação, enquadramento e resolução. Essa decisão buscou aproximar a análise das condições práticas encontradas em inspeções prediais.

Utilizou-se o mesmo conjunto de validação empregado na etapa anterior da pesquisa, composto por 50 imagens reais de manifestações patológicas em fachadas e elementos construtivos, distribuídas igualmente em cinco categorias: bolor, corrosão, fissura, umidade e vegetação, com dez imagens por classe. Cada imagem havia sido previamente classificada e rotulada por engenheiros especialistas em patologias prediais durante a construção do conjunto de dados, constituindo o padrão-ouro adotado como referência nas avaliações. As imagens foram preservadas em sua resolução e em suas condições originais de captura, sem recorte ou pré-processamento, o que garantiu equivalência direta entre as abordagens comparadas. A reutilização integral do conjunto possibilitou confrontar, com as mesmas imagens e o mesmo gabarito pericial, o desempenho da rede neural convolucional (CNN), treinada na etapa anterior, com o do modelo multimodal pré-treinado Google Gemini 2.5 Flash.

A Figura 1 apresenta um exemplo de imagem real enviada ao modelo para análise. Trata-se de uma fotografia que contém manifestações patológicas visíveis em um elemento construtivo e que foi utilizada como entrada experimental nesta etapa do estudo.

Figura 1 – Imagem real submetida ao modelo multimodal para análise de manifestações patológicas.



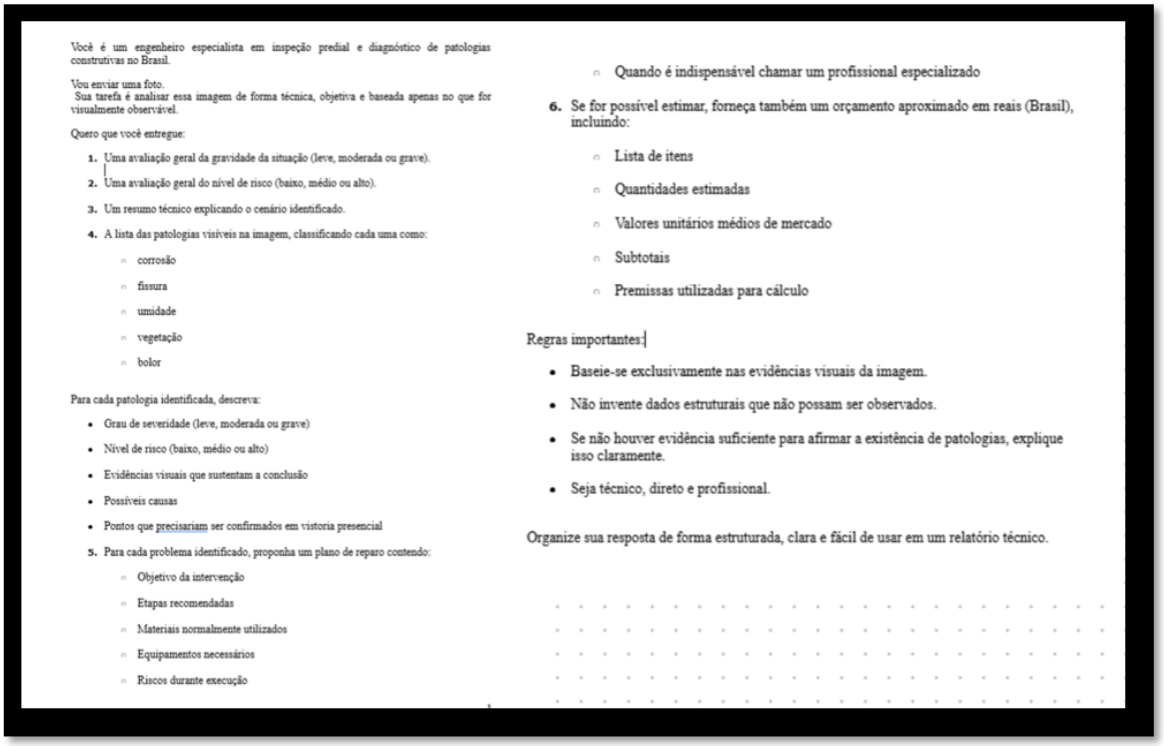
Fonte: autoria própria.

2.2. ESTRUTURAÇÃO DO PROMPT

Para padronizar a interação com o modelo e reduzir ambiguidades, desenvolveu-se um prompt estruturado com instruções claras sobre o papel técnico atribuído ao sistema; as categorias de manifestações patológicas consideradas — corrosão, fissura, umidade, vegetação e bolor —; a classificação do nível de gravidade — leve, moderada ou grave — e do nível de risco — baixo, médio ou alto —; e a obrigatoriedade de fundamentação exclusiva em evidências visualmente observáveis. Também foram incluídas instruções explícitas para evitar inferências estruturais não sustentadas por elementos visíveis.

A Figura 2 apresenta a captura do prompt estruturado utilizado na submissão das imagens ao modelo. A imagem documenta as instruções fornecidas ao sistema, incluindo os critérios de classificação, a organização esperada da resposta e as restrições metodológicas impostas para garantir o rigor técnico.

Figura 2 – Prompt estruturado utilizado para orientar a análise das imagens pelo modelo multimodal.



Você é um engenheiro especialista em inspeção predial e diagnóstico de patologias construtivas no Brasil.

Vou enviar uma foto.
Sua tarefa é analisar essa imagem de forma técnica, objetiva e baseada apenas no que for visualmente observável.

Quero que você entregue:

1. Uma avaliação geral da gravidade da situação (leve, moderada ou grave).
2. Uma avaliação geral do nível de risco (baixo, médio ou alto).
3. Um resumo técnico explicando o cenário identificado.
4. A lista das patologias visíveis na imagem, classificando cada uma como:
   - corrosão
   - fissura
   - umidade
   - vegetação
   - bolor

Para cada patologia identificada, descreva:

- Grau de severidade (leve, moderada ou grave)
- Nível de risco (baixo, médio ou alto)
- Evidências visuais que sustentam a conclusão
- Possíveis causas
- Pontos que precisariam ser confirmados em vistoria presencial

5. Para cada problema identificado, proponha um plano de reparo contendo:
   - Objetivo da intervenção
   - Etapas recomendadas
   - Materiais normalmente utilizados
   - Equipamentos necessários
   - Riscos durante execução
   - Quando é indispensável chamar um profissional especializado
6. Se for possível estimar, forneça também um orçamento aproximado em reais (Brasil), incluindo:
   - Lista de itens
   - Quantidades estimadas
   - Valores unitários médios de mercado
   - Subtotais
   - Premissas utilizadas para cálculo

Regras importantes:

- Baseie-se exclusivamente nas evidências visuais da imagem.
- Não invente dados estruturais que não possam ser observados.
- Se não houver evidência suficiente para afirmar a existência de patologias, explique isso claramente.
- Seja técnico, direto e profissional.

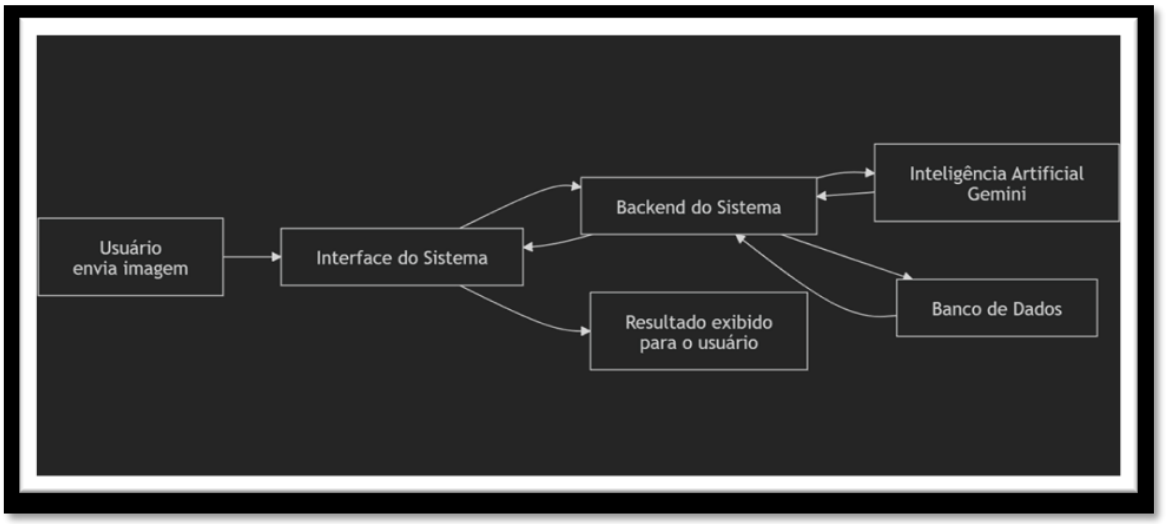
Organize sua resposta de forma estruturada, clara e fácil de usar em um relatório técnico.

Fonte: autoria própria.

Após a submissão da imagem juntamente com o prompt estruturado, o modelo gerou uma resposta textual organizada de acordo com as diretrizes estabelecidas. A avaliação das respostas considerou a coerência técnica das classificações, a consistência entre a identificação e a justificativa apresentada, a capacidade de reconhecer simultaneamente múltiplas manifestações patológicas e a adequação da linguagem ao formato de relatório técnico.

A integração com o modelo foi realizada por meio de uma função de back-end responsável pela comunicação entre o sistema e a inteligência artificial. Conforme observado na implementação, o processo envolve o envio da imagem e do prompt, seguido do recebimento e do armazenamento da resposta estruturada. A Figura 3 apresenta o fluxo de funcionamento da arquitetura do sistema.

Figura 3 – Fluxo do processo.



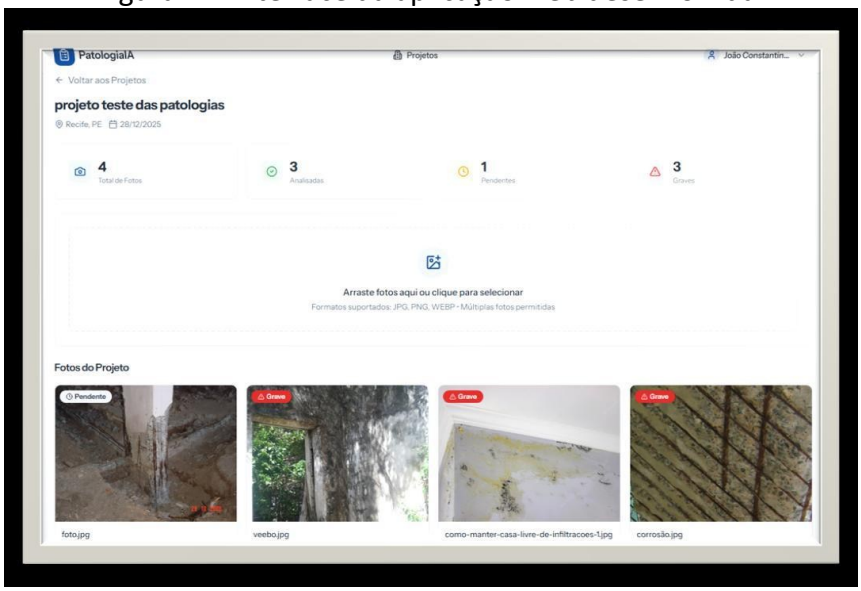
Fonte: autoria própria.

2.3. INTERFACE

A aplicação foi implementada com o objetivo de integrar a inteligência artificial ao processo de detecção e de tratamento de manifestações patológicas. Com o uso do modelo previamente treinado, a interface permite aos usuários acessar os resultados de forma prática e visual. O front-end, desenvolvido com foco na usabilidade e na clareza, está hospedado na plataforma Vercel, o que assegura fácil acesso à aplicação por meio da web (Velozo et al., 2025).

A interface do sistema foi projetada para facilitar a visualização das análises realizadas, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Interface da aplicação web desenvolvida.



Fonte: autoria própria.

Nesta etapa da pesquisa, desenvolveu-se um sistema computacional integrado à inteligência artificial multimodal, com o objetivo de operacionalizar a análise de manifestações patológicas a partir de imagens reais.

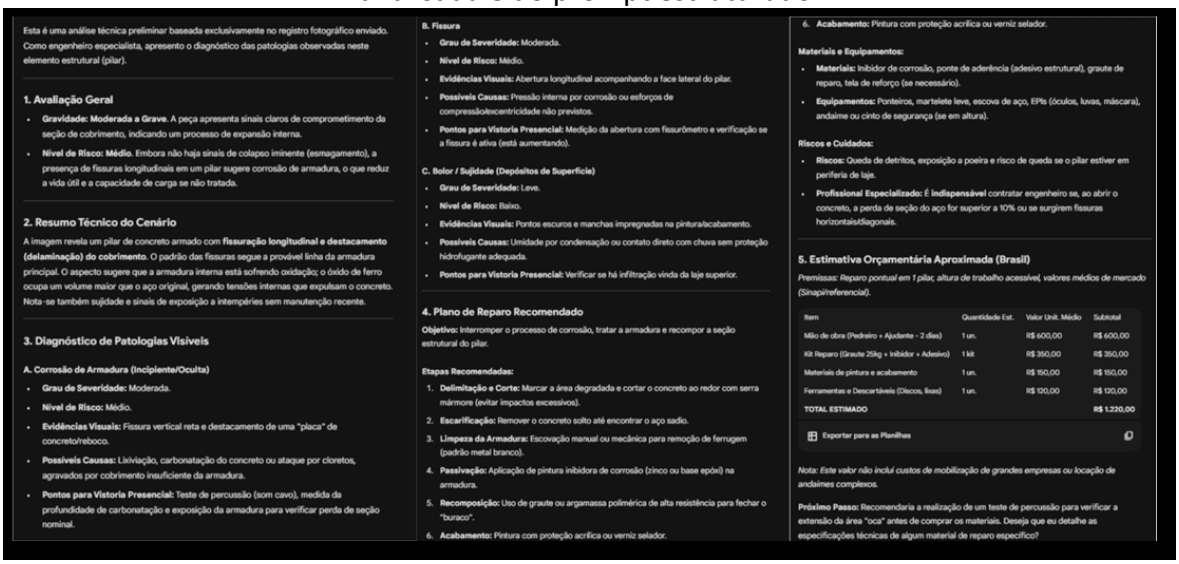
A solução foi estruturada em uma arquitetura composta por front-end, back-end e banco de dados. A interface foi desenvolvida com React, enquanto a camada de processamento foi implementada em TypeScript e executada em ambiente Deno. Para a persistência dos dados, utilizou-se o Supabase, baseado em PostgreSQL.

2.4. SAÍDAS

A resposta gerada pelo modelo segue um formato estruturado, que contém a classificação da severidade e do risco, um resumo técnico, a identificação das manifestações patológicas, as evidências visuais, as possíveis causas, os planos de intervenção e as estimativas orçamentárias.

A Figura 5 apresenta um exemplo de resultado exibido no sistema, no qual se destacam visualmente os principais elementos da análise. Observa-se que a resposta inclui a avaliação geral da gravidade e do risco, a identificação das manifestações patológicas visíveis, justificativas fundamentadas nos elementos visuais identificados e a proposição de um plano de intervenção compatível com as condições observadas.

Figura 5 – Exemplo de resposta gerada pelo modelo multimodal a partir da imagem analisada e do prompt estruturado.



Fonte: autoria própria.

Os resultados obtidos foram analisados qualitativamente e comparados, de forma descritiva, com aqueles discutidos na etapa anterior da pesquisa, baseada no treinamento de

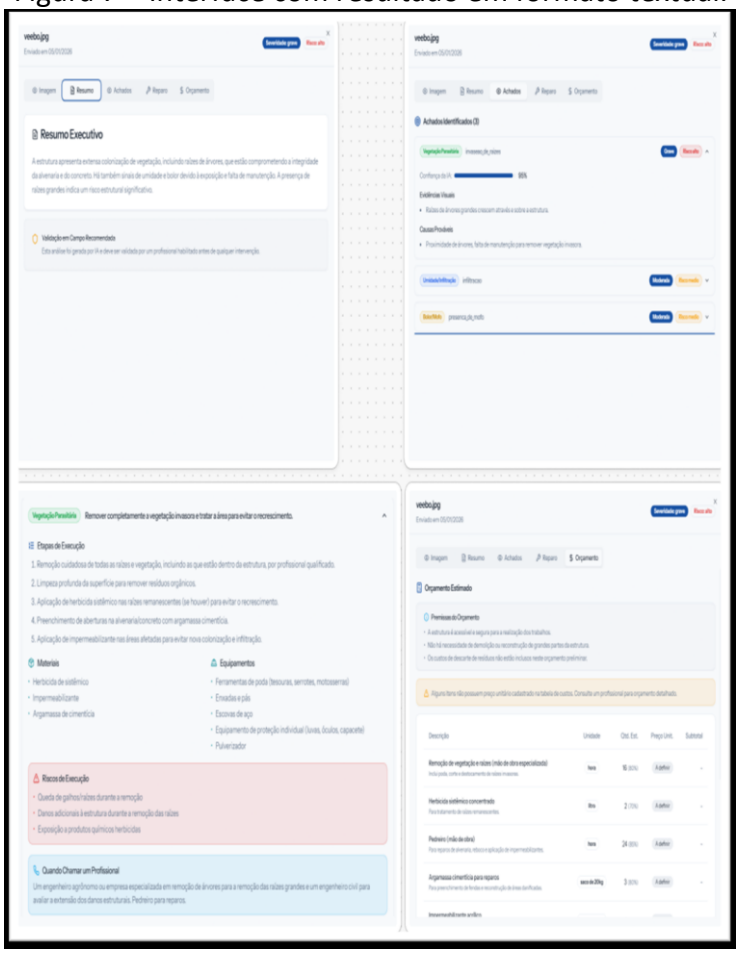
redes neurais convolucionais. Essa comparação permitiu avaliar diferenças relacionadas à estabilidade, à capacidade de generalização e à consistência técnica das classificações produzidas.

A Figura 6 apresenta os resultados de forma visual ao usuário, enquanto a Figura 7 os apresenta em formato textual, com todo o diagnóstico realizado.

Figura 6 – Interface com apresentação visual do resultado.

Fonte: autoria própria.

Figura 7 – Interface com resultado em formato textual.



Fonte: autoria própria.

3. RESULTADOS DA APLICAÇÃO

3.1. COMPARAÇÃO BREVE DAS APLICAÇÕES

Os resultados evidenciaram avanço significativo em relação à etapa anterior, com maior estabilidade e capacidade de generalização proporcionadas pelo uso de um modelo multimodal pré-treinado (Vaswani et al., 2017). Em comparação com as redes convolucionais treinadas com conjuntos reduzidos de dados, observou-se maior consistência, mesmo diante de variações de iluminação, ângulo e cenário. O sistema possibilitou a identificação e a organização estruturada de manifestações patológicas, inclusive de múltiplas ocorrências simultâneas, como fissuras, umidade, corrosão e vegetação, além de estabelecer relações entre elas.

As respostas apresentaram justificativas baseadas em evidências visuais, o que aumentou sua confiabilidade. De modo geral, os resultados indicam bom desempenho desses modelos mesmo quando há poucos dados rotulados, tornando-os viáveis como ferramentas de apoio à triagem na engenharia civil, sem substituir a análise técnica especializada.

3.2. AVALIAÇÃO QUANTITATIVA E QUALITATIVA

Para a avaliação quantitativa do modelo, as 50 imagens foram submetidas individualmente ao Gemini 2.5 Flash por meio da aplicação web desenvolvida. Em seguida, confrontou-se a manifestação patológica principal identificada pelo modelo com o gabarito previamente estabelecido. O mesmo conjunto foi empregado na avaliação da CNN da etapa anterior, o que possibilitou a comparação direta entre as abordagens. Os resultados por classe são apresentados na Tabela 1. As Figuras 8 e 9 apresentam as matrizes de confusão da CNN e do Gemini 2.5 Flash, respectivamente, e a Figura 10 exibe as curvas de treinamento da CNN, nas quais se observa o sobreajuste (overfitting).

Tabela 1 – Desempenho comparativo no mesmo conjunto de validação (50 imagens, dez por classe).

Manifestação patológica	Recall CNN (%)	Recall Gemini (%)
Bolor	50%	30%
Corrosão	40%	100%
Fissura	90%	100%
Umidade	80%	90%
Vegetação	30%	80%
Acurácia global	**58% (29/50)**	**80% (40/50)**

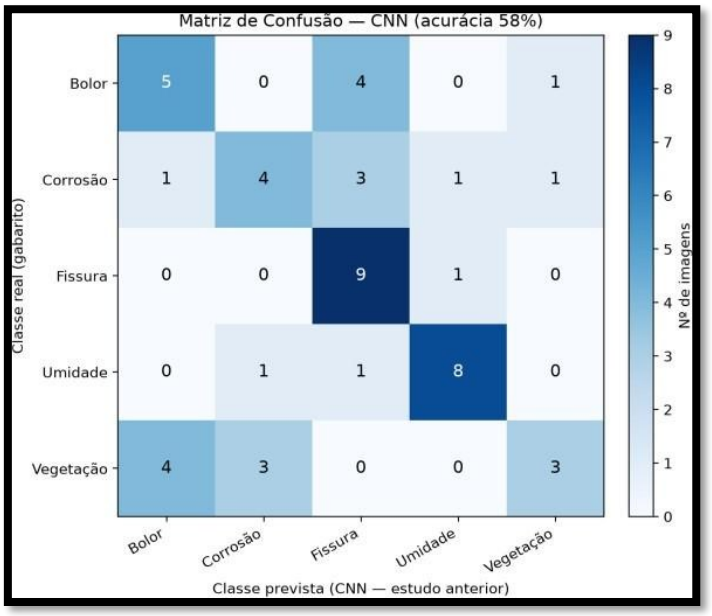
Fonte: autoria própria.

O modelo multimodal alcançou acurácia global de 80% (40/50), em comparação com 58% (29/50) da CNN avaliada no mesmo conjunto, o que representa um ganho de 22 pontos percentuais sem a necessidade de treinamento adicional. O Gemini apresentou desempenho superior na identificação de corrosão (100%, em comparação com 40%) e de vegetação (80%, em comparação com 30%), além de classificar corretamente todas as fissuras. A principal limitação foi observada na categoria bolor, com uma taxa de acerto de 30%, frequentemente confundida com umidade. Esse comportamento é compreensível, pois o crescimento de bolor decorre de processos de umidade, com os quais compartilha evidências visuais semelhantes. Ressalta-se que a CNN exigiu 50 épocas de treinamento supervisionado, e suas curvas de aprendizado indicaram a estabilização da perda de validação em torno de 1,2 e o afastamento progressivo em relação à perda de treinamento, o que caracteriza o sobreajuste associado ao tamanho reduzido do conjunto. O Gemini, por sua vez, operou em regime de inferência direta, sem qualquer treinamento adicional no âmbito desta pesquisa, evidenciando a capacidade de generalização dos modelos fundacionais multimodais.

A Figura 8 apresenta a matriz de confusão da CNN utilizada na etapa anterior. O modelo alcançou acurácia global de 58%, com diferenças de desempenho entre as cinco classes avaliadas.

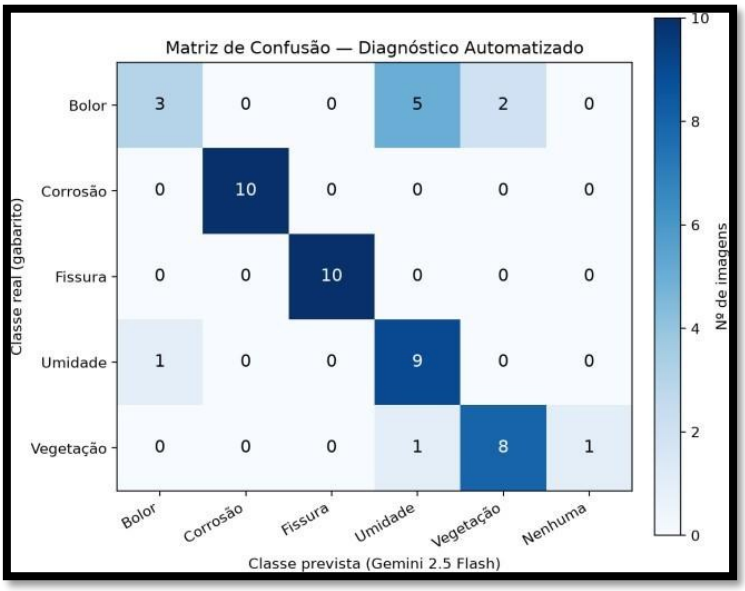
A Figura 9 apresenta a matriz de confusão do Gemini 2.5 Flash no mesmo conjunto de validação. O modelo alcançou acurácia de 80% e demonstrou melhor reconhecimento das manifestações patológicas em comparação com o modelo anterior.

Figura 8 – Matriz de confusão da CNN (etapa anterior).



Fonte: autoria própria.

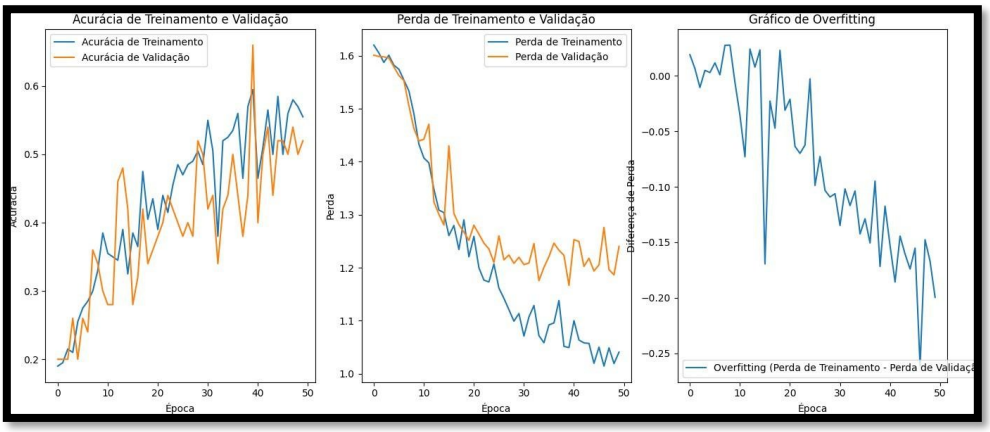
Figura 9 – Matriz de confusão do Gemini 2.5 Flash.



Fonte: autoria própria.

A Figura 10 apresenta as curvas de treinamento da CNN e evidencia o afastamento entre as métricas de treinamento e de validação, comportamento compatível com o sobre ajuste do modelo.

Figura 10 – Curvas de treinamento da CNN.



Fonte: autoria própria.

A Figura 11 apresenta uma síntese das funcionalidades e do desempenho da aplicação web com inteligência artificial desenvolvida para apoiar o diagnóstico de manifestações patológicas em edificações.

Figura 11 – Infográfico-síntese das funcionalidades e do desempenho da aplicação web.

Fonte: autoria própria.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que o uso de inteligência artificial multimodal pré-treinada representa um avanço importante na realização do diagnóstico de manifestações patológicas em edificações, pois torna o processo mais eficiente e confiável. Em comparação com abordagens anteriores,

baseadas em redes neurais treinadas com poucos dados, o modelo utilizado demonstrou maior estabilidade e capacidade de lidar com diferentes condições reais, como variações de iluminação, ângulo e contexto das imagens.

Além disso, o modelo foi capaz de identificar simultaneamente múltiplas manifestações patológicas e de apresentar análises organizadas, com justificativas claras e baseadas em evidências visuais, o que aumenta a confiança nos resultados. A integração desse modelo a um sistema computacional de uso prático reforça seu potencial de aplicação cotidiana na engenharia civil, especialmente como ferramenta de apoio à triagem e à análise inicial.

Ainda assim, é importante destacar que a tecnologia não substitui a avaliação nem a responsabilidade do profissional técnico. Portanto, deve ser utilizada como ferramenta de apoio à tomada de decisão especializada.

REFERÊNCIAS

BARROS, G. A.; SILVA, A. A. P. Inovações na correção de manifestações patológicas em edifícios: revisão de literatura. Revista Científica Semana Acadêmica, v. 12, 2024.

CARVALHO, N. W. D.; BARRETO, J. C. P.; ALBUQUERQUE, E. S.; VELOZO, J. H. P.; SILVA, R. P.; MONTEIRO, E. C. B. Desenvolvimento de um software com rede neural para identificação e solução de manifestações patológicas em edificações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 66., 2025. Anais [...]. 2025.

FREITAS, C. Dataset e corpus. In: CASELI, H. M.; NUNES, M. G. V. (org.). Processamento de linguagem natural: conceitos, técnicas e aplicações em português. 1. ed. Brasil, 2023. cap. 14, p. 228.

LUDERMIR, T. B. Inteligência artificial e aprendizado de máquina: estado atual e tendências. Estudos Avançados, v. 35, n. 101, 2021.

SILVA, A. S.; COSTA, D. B. Análise do uso de tecnologias digitais para identificação automatizada de patologias em construções. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022. Anais [...]. 2022.

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

VELOZO, J. H. P.; BARRETO, J. C. P.; ALBUQUERQUE, E. S. et al. Software baseado em redes neurais convolucionais para diagnóstico e tratamento de manifestações patológicas em fachadas. Science, Society and Emerging Technologies, v. 3, n. 1, jul. 2025. DOI: https://doi.org/10.51859/amplla.sset.3125-10.

CAPÍTULO V

O IMPACTO DA FALTA DE MANUTENÇÃO PREDIAL NA CONSERVAÇÃO DAS EDIFICAÇÕES: ESTUDO DE CASO

THE IMPACT OF THE LACK OF BUILDING MAINTENANCE ON THE BUILDINGS PRESERVATION: A CASE STUDY

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-5

Adriana Palmério Silva [1]
Alexandre de Souza Maia [2]
Eliana Cristina Barreto Monteiro [3]
Victor Marcelo Estolano de Lima [4]
Bruna Correia Teixeira [5]

[1] Mestrando em Engenharia Civil. Escola Politécnica de Pernambuco – POLI-UPE
[2] Mestrando em Engenharia Civil. Escola Politécnica de Pernambuco – POLI-UPE
[3] Professora livre docente da Escola Politécnica de Pernambuco – POLI-UPE e da Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP.
[4] Professor Adjunto da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco – POLI-UPE
[5] Doutoranda em Engenharia Civil. Escola Politécnica de Pernambuco – POLI-UPE

RESUMO

A manutenção predial constitui um conjunto de ações técnicas e administrativas que se destinam a preservar as condições de segurança, funcionalidade, durabilidade e desempenho das edificações. Entretanto, a ausência de planejamento adequado, a execução incorreta de serviços e a negligência na inspeção periódica contribuem para o surgimento de manifestações patológicas, aumento dos custos operacionais e riscos à integridade dos usuários.

Este artigo apresenta a importância da manutenção predial, e um estudo de caso sobre os impactos ocorridos em uma estrutura devido à falta de manutenção preventiva e corretiva periódicas em sistemas de esgotamento sanitário, encontrados em uma edificação multifamiliar, bem como técnicas para implantação de um sistema eficiente de manutenção preventiva e corretiva. Por meio deste estudo de caso, será possível concluir sobre os impactos decorrentes da ausência de um planejamento adequado de manutenção predial, evidenciando sua influência no desempenho, na durabilidade e na segurança da edificação, bem como a importância da adoção de práticas preventivas para a preservação do patrimônio.

Palavras-chave: manutenção predial. manifestação patológica. inspeção predial. conservação de edificações. engenharia de manutenção.

ABSTRACT

The building maintenance comprises a set of technical and administrative actions aimed at preserving the safety, functionality, durability, and performance conditions of buildings. However, the lack of proper planning, inadequate execution of maintenance services, and negligence regarding periodic inspections contribute to the development of pathological manifestations, increased operational costs, and risks to occupants' safety and structural integrity. This paper discusses the importance of building maintenance and presents a case study on the impacts caused by the absence of periodic preventive and corrective maintenance in sanitary sewage systems identified in a multifamily residential building. Furthermore, it addresses techniques and strategies for implementing an efficient preventive and corrective maintenance management system.

Through this case study, it will be possible to draw conclusions regarding the impacts resulting from the absence of an adequate building maintenance plan, highlighting its influence on the building's performance, durability, and safety, as well as the importance of adopting preventive practices for the preservation of assets.

Keywords: building maintenance. building pathology. building inspection. building conservation. maintenance engineering.

1. INTRODUÇÃO

As edificações estão constantemente sujeitas à ação do tempo, intempéries, desgaste natural dos materiais, utilização inadequada, de falhas executivas e desgastes pelo uso. Nesse contexto, a manutenção predial surge como elemento essencial para garantir o desempenho e a vida útil das construções. Como a NBR 15.575 (2024a) determina, a vida útil de uma construção só é alcançada se houver um controle e execução rigorosa do uso, operação e manutenção. A NBR 5674 (2024b) estabelece que a manutenção predial deve ser orientada para "preservar o previsto em projeto ao longo do tempo". A falta de manutenção adequada pode ocasionar diversos problemas estruturais e funcionais, como: infiltrações, manchas, bolor ou mofo, eflorescência, fissuras, trincas, rachaduras, corrosão de armaduras, brocas, falhas elétricas, degradação de revestimentos, comprometimento das instalações hidrossanitárias e desgastes das esquadrias.

Além disso, as deficiências na manutenção impactam diretamente em custos imprevistos, na desvalorização do imóvel e na segurança dos ocupantes (Neto, 2013).

O intuito deste estudo de caso é mostrar que a manutenção periódica do imóvel aumenta sua vida útil, mantém a funcionalidade dos sistemas e a valorização mercadológica, prolongando o tempo de vida útil e prevenindo o surgimento de manifestações patológicas decorrentes de mau uso, ou mesmo deficiência dos equipamentos. Essa manutenção deve atender ao especificado no Manual do Proprietário fornecido pela Construtora, a observância das orientações do manual constitui importante instrumento de segurança jurídica para o proprietário ou condomínio, uma vez que comprova o cumprimento das obrigações de manutenção previstas nas normas técnicas aplicáveis, especialmente a NBR 5674 (2024b).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A manutenção predial, conforme a norma ABNT NBR 5674 (2024b), pode ser definida como um conjunto de atividades técnicas e administrativas destinadas a preservar ou recuperar a capacidade funcional dos sistemas constituintes de forma a atender às necessidades de segurança, habitabilidade e durabilidade de uma edificação. O Quadro 1, apresenta a classificação dos diversos tipos de manutenção.

Quadro 1 – Classificação de Manutenções

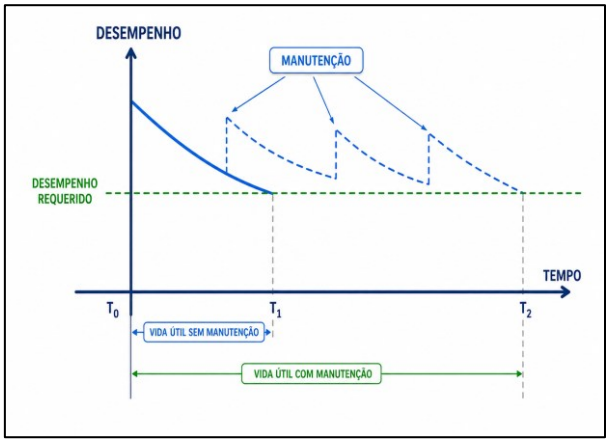
Classificação da Manutenção	Definição	Exemplos
Manutenção Preventiva	Realizada periodicamente com o objetivo de reduzir e evitar falhas, além de minimizar o desgaste prematuro dos sistemas da edificação.	• Limpeza de calhas; • Revisão de instalações elétricas; • Inspeção de impermeabilizações; • Pintura de proteção; • Revisão de esquadrias; • Revisão de cobertas; • Revisão das caixas de gordura e esgoto; • Poda de vegetação.
Manutenção Preditiva	Baseada no monitoramento técnico e na análise de desempenho dos sistemas construtivos, permitindo identificar tendências de falhas antes que ocorram.	• Termografia; • Monitoramento de fissuras; • Avaliação de vibrações.
Manutenção Corretiva	Realizada após a ocorrência de falha ou pane. Consiste em intervenção emergencial ou reparo destinado a restabelecer o funcionamento do sistema ou elemento construtivo.	• Reparo de vazamentos; • Substituição de componentes danificados; • Recuperação de instalações elétricas; • Correção de infiltrações; • Troca de equipamentos defeituosos.

Fonte: Autores, Adaptado de ABNT NBR 5674 (2024b).

A atividade de manutenção possui uma influência decisiva na vida útil de uma edificação. Uma construção só conseguirá atender ao período de vida útil estipulado em projeto se for realizada uma série de manutenções na sua fase de uso, de modo a evitar e corrigir qualquer perda de desempenho que comprometa sua integridade (Bolina; Tutikian; Helene, 2019).

O Gráfico 1, demonstra que a manutenção não impede o envelhecimento natural dos sistemas, mas retarda a perda de desempenho, aumentando a vida útil, reduzindo custos de reparos corretivos, mantendo a segurança e funcionalidade da edificação por mais tempo.

Gráfico 1 – Desempenho de uma edificação ao longo do tempo

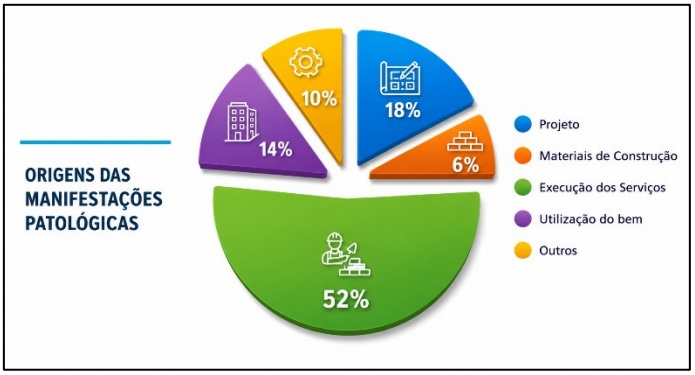


Fonte: Bolina; Tutikian; Helene (2019)

Segundo a NBR 15.575 (2024a), vida útil é o período de tempo em que uma edificação e seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetadas e construídas considerando a periodicidade e correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo Manual de Uso, Operação e Manutenção.

Vale ressaltar que apesar de representar uma pequena parte no campo geral das origens das manifestações patológicas, conforme apresentado abaixo na Figura 1, os impactos gerados pelas deficiências em um programa de manutenção e sua falta de aderência, produzem consequências e efeitos que tornam a manutenção predial fundamental para ser executada, conforme representado no Quadro 2:

Figura 1 – Origens das Manifestações Patológicas



Fonte: Oliveira (2013).

Quadro 2 – Impactos pela falta de Manutenção

Categoria de Impacto	**Consequências / Efeitos**
Impactos Econômicos	• Aumento dos custos corretivos; • Desvalorização do imóvel; • Maior consumo energético.
Impactos Estruturais	• Redução da vida útil da edificação; • Comprometimento da estabilidade estrutural.
Impactos à Segurança	• Risco de acidentes; • Queda de revestimentos; • Incêndios; • Colapsos localizados.
Impactos Operacionais	• Interrupção de atividades; • Desconforto aos usuários; • Perda de funcionalidade dos ambientes.

Fonte: Autores, adaptado de ABNT NBR 5674 (2024b), ABNT NBR 15575 (2024a).

Para a realização deste estudo de caso, foram selecionadas as principais manifestações patológicas identificadas na edificação e que apresentam relação direta com a ausência ou inadequação das atividades de manutenção predial. Entre as manifestações analisadas destacam-se os processos de infiltração, umidade, o desplacamento de revestimentos, eflorescências, trincas e fissuras, além da deterioração de componentes construtivos. Essas anomalias representam algumas das patologias mais comuns em edificações com uma manutenção ineficiente ou até mesmo, inexistente.

2.1. MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ASSOCIADAS À FALTA DE MANUTENÇÃO

Segundo Bolina, Tutikian e Helene (2019), Patologia das Construções é a ciência que procura, de forma sistêmica, estudar os defeitos incidentes nos materiais construtivos, componentes e elementos ou na edificação como um todo, buscando diagnosticar as origens e compreender os mecanismos de deflagração e de evolução do processo patológico, além de suas formas de manifestação.

A norma NBR 15.575 (2024a) define como manifestação patológica a irregularidade que se manifesta no produto e/ou sistema - em função da falha no projeto, na execução, montagem, fabricação, instalação, uso ou manutenção, bem como os problemas que não decorrem do envelhecimento natural.

Manifestações Patológicas apresentam-se como indicadores de um sistema com início de um processo degenerativo, e para conseguir executar as correções adequadas é fundamental conhecer a origem, suas causas e os mecanismos envolvidos neste processo de degradação.

Os agentes causadores de deterioração dos sistemas podem ser de cunho intrínseco ou extrínseco. Classificam-se como agentes causadores intrínsecos os processos de deterioração que são inerentes aos sistemas - processos que possuem sua origem nos materiais, peças empregadas nas fases de produção, execução ou uso das obras, por falhas humanas ou falhas de comportamento do material. Segundo Bolina, Tutikian e Helene (2019), por outro lado, os agentes causadores extrínsecos de deterioração são aqueles que atuam de fora para dentro, durante a fase de uso ou concepção, independente da composição interna do material e das falhas inerentes ao processo construtivo do sistema ou da execução, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 –Exemplos de Agentes Causadores

Agentes Causadores	Exemplos
Intrínsecos	• Gás Carbônico • Deficiências de execução • Aplicação de materiais reativos no concreto
Extrínsecos	• Variações Volumétricas de origem termo-higroscópicas; • Sobrecargas • Impactos • Vibrações Mecânicas • Agentes Químicos e biológicos • Ação do Fogo

Fonte: Autores, Adaptado de Souza e Ripper (1998).

Os agentes iniciam processos de deterioração do material, sendo estes mecanismos classificados em químicos, biológicos, físicos e mecânicos. O simples estudo da forma de evolução destes processos, se torna fundamental para prevenir os sistemas contra o surgimento de anomalias que comprometam o uso da edificação.

No que diz respeito aos mecanismos de degradação, eles podem ser de natureza química, biológica, física e mecânica, são processos que promovem uma alteração de caráter constitutivo de cunho químico aos materiais de um sistema (Bolina; Tutikian; Helene, 2019). Estas alterações por sua vez impactam diretamente nas propriedades do elemento, acarretando mudanças na aparência física e comportamento mecânico. Um dos melhores exemplos deste mecanismo é o processo corrosivo

Já os mecanismos de deterioração biológicas, estão associados a processos de alteração das propriedades intrínsecas dos materiais devido a ação de macro ou microrganismos existentes no meio. A proliferação destes organismos comumente ocorrentes nas superfícies dos materiais, são potencializadas em ambientes com grande umidade e elevados ciclos de umidificação e secagem, além de baixa insolação. As condições proporcionadas por este mecanismo, auxiliam no desenvolvimento de deteriorações secundárias de cunho químico ou físico, induzindo a envelhecimento precoce, alterações no aspecto da superfície e comprometimento da durabilidade e integridade (Bolina; Tutikian; Helene, 2019). Como exemplo é possível visualizar estes mecanismos ocorrendo em processos de degradação de madeiras através da ação de fungos ou o crescimento de plantas e raízes em estruturas de concreto causando expansão dos elementos.

Os mecanismos de deterioração física promovem alterações volumétricas. Geralmente provêm de processos termo-higroscópicos, ou seja, variações volumétricas causadas pela dilatação térmica do material ou variações higroscópicas promovidas pela absorção e evaporação de água pelos poros da peça. Quando submetido ao calor e umidade, ele se expande e ao ser submetido ao frio ou secagem, ele se contrai e com a repetitividade destes ciclos percebe-se a propagação de microfissuras de origem térmica ou higroscópica em sua superfície (Bolina; Tutikian; Helene, 2019).

Os mecanismos de deterioração mecânica ocorrem conforme os esforços mecânicos ao qual são submetidos os sistemas, que podem culminar no surgimento de fissuras. Diferentemente da deterioração física, os mecanismos de deterioração mecânica têm como sua origem fatores externos, como sobrecargas ou choques mecânicos, ou seja, esforços oriundos de ações não previstas em projeto. (Bolina; Tutikian; Helene, 2019).

Muitas das manifestações patológicas podem ser classificadas como defeitos originados a partir de um vício de projeto ou construtivo. Estas falhas produzidas durante a fase de produção, são de responsabilidade do produtor ou responsável técnico do projeto, entretanto as falhas produzidas durante a fase de utilização não necessariamente serão de responsabilidade deste (Bolina; Tutikian; Helene, 2019).

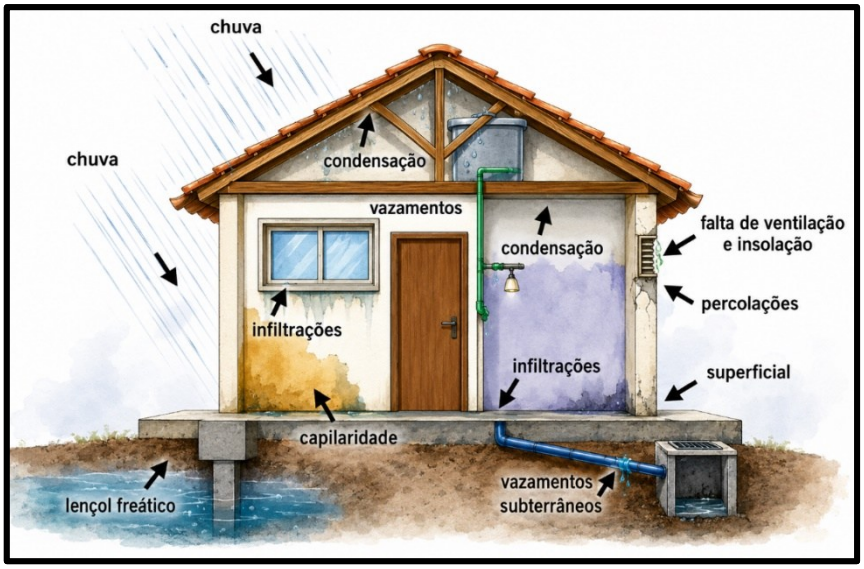
Abaixo serão apresentados alguns casos de manifestações patológicas que podem acontecer devido à falta de atenção com a manutenção dos sistemas prediais.

2.1.1. Umidade de Infiltração

Conforme a NBR 9575 (2010), infiltrações são penetrações indesejáveis de fluídos nas construções. De acordo com Lonzetti (2010), um dos principais agentes causadores de manifestações patológicas em edificações é a água, devido à elevada capacidade de provocar degradação estrutural, deterioração de pinturas, desagregação de revestimentos e formação de ambientes úmidos, favorecendo a proliferação de fungos e bactérias, sendo também prejudiciais à saúde.

A presença indesejável de águas na edificação se origina basicamente por ascensão capilar do solo, infiltração de água decorrente de vazamentos ou penetração por frestas ou fissuras provenientes de movimentações térmicas, trincas em fachadas, caixas de luz expostas, modificações e condensação de vapor por deficiência de ventilação (Silva e Oliveira, 2018). Conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Origens de Infiltrações



Fonte: Autores, adaptado de Pozzobon (2007).

Ainda segundo Silva e Oliveira (2018), a umidade de infiltração é aquela causada pela penetração de água no interior da edificação pelas paredes por meio de trincas, pela alta capacidade dos materiais de absorverem a umidade do ar, ou por falhas na interface dos elementos construtivos.

As infiltrações representam uma das manifestações patológicas mais recorrentes em edificações, dentre as principais causas são encontradas em:

- *Falhas de impermeabilização;*
- *Tubulações danificadas;*
- *Fissuras e Trincas;*
- *Falta de manutenção em coberturas;*
- *Drenagem inadequada*

Sua origem decorrente da ausência de manutenção periódica nos sistemas de impermeabilização e drenagem, compromete diretamente o desempenho, a estanqueidade e a vida útil das edificações. Com o passar do tempo, diversos fatores físicos, químicos e mecânicos contribuem para a degradação da edificação.

Segundo Oliveira e Nunes (2020), a infiltração por capilaridade é o mais comum encontrado nas construções, principalmente em residências. Devido ao fato de as paredes estarem ligadas à fundação e essa mesma estar em contato direto com o solo, a água que está presente nesse solo consegue se infiltrar progressivamente pelos poros do concreto e da

argamassa através do efeito da capilaridade, subindo por toda a estrutura até se apresentar nas áreas inferiores das paredes. Esse efeito pode ser observado visualmente, pois expõe manchas de bolor, eflorescências, criptoflorescência e, em alguns casos, até gotículas de água.

A umidade por condensação é comum em ambientes expostos a vapor de água, onde o mesmo entra em contato com uma superfície de menor temperatura (como vidros, metais e paredes), retorna para o estado líquido e penetra nas superfícies vulneráveis. Segundo Neves (2021), “Esse tipo de infiltração é preocupante, pois apresenta uma maior penetração nos poros dos gessos e em outros materiais de revestimento. Assim, favorecem a formação de mofo”.

Ainda segundo Oliveira e Nunes (2020) a umidade decorrente de intempéries, resultante das águas da chuva, que penetra pelos telhados, lajes e paredes em decorrência da falta de uma impermeabilização eficiente. É comum ver que as estruturas acometidas por essa patologia apresentam, em períodos chuvosos, manchas de formas e tamanhos variados nas paredes. Em período de longas precipitações, essas manchas podem se desenvolver e haver a ocorrência de bolores, eflorescências e criptoflorescência, que são danos causados por fungos (no primeiro caso) e formação de sais minerais (no segundo e terceiro caso).

As infiltrações causadas por falhas nos sistemas de tubulações podem ser decorrentes do desgaste natural dos materiais, falhas de execução, conexões inadequadas, rompimentos ou ausência de manutenção preventiva nas instalações hidráulicas e sanitárias. A presença contínua de umidade proveniente de vazamentos pode provocar desagregação, formação de bolores, eflorescências e alterações de caráter físico-químico dos materiais.

2.1.1.1. Eflorescências e Criptoflorescências

Para Verçoza, (1991), a eflorescência, é caracterizada com o aparecimento de formações salinas na superfície dos materiais. Na maior parte dos casos as eflorescências não causam problemas maiores que o mau aspecto resultante, mas há circunstâncias em que o sal formado pode levar a lesões tais como o descolamento dos revestimentos ou pinturas, desagregação das paredes e até queda de elementos construtivos. Na grande maioria dos casos as eflorescências em materiais de construção são causadas por sais de cálcio, de sódio, de potássio, de magnésio ou de ferro; raramente por outros. E também na maioria dos casos esses sais já fazem parte integrante do material de construção que, ao ser atravessado pela

umidade, os dissolve na água. Então a água com o material dissolvido vem à superfície. Ali a água evapora, mas o sal se deposita formando as manchas.

Manchas brancas, com aspecto de nuvem, pulverulentas geralmente são causadas por sulfatos (de sódio, de potássio, cálcio ou magnésio) e mais raramente por carbonato de sódio ou carbonato de potássio. Elas são bastante e facilmente solúveis em água e não desagregam os materiais. A maior lesão que podem causar, afora o mau aspecto de depreciação, é o descolamento de pinturas (Verçoza 1991).

Manchas de cor branca com de aspecto escorrido de acordo com Verçoza (1991) caracterizam um tipo de eflorescência que não é solúvel em água e é muito aderente. São manchas de carbonato de cálcio, comumente formado pela reação do hidróxido de cálcio (nata de cal) com o gás carbônico do ar. O hidróxido existe no cimento e na cal. O carbonato se identifica rapidamente derramando-se ácido clorídrico sobre a incrustação: forma efervescência.

Bolor, Mofo e Limo são a manifestações de um tipo de microvegetais, os fungos, vegetais inferiores, que não contêm clorofila. Nos vegetais ditos superiores é a clorofila que decompõe as substâncias orgânicas mais complexas para formar as substâncias mais simples que servem de alimento para o vegetal. Como os fungos não têm clorofila suas raízes (chamadas micélios) segregam enzimas, que fazem a decomposição. Essas enzimas funcionam como um ácido sobre o material onde cresce o fungo: o material é atacado e queimado, tomando quase sempre a cor escura quase preta. Há então o surgimento de manchas e, numa idade mais avançada, desagregação da superfície. Em alguns tipos de fungos as manchas podem ter outra cor que não a preta (esverdeada, branca, avermelhada, etc.) devido ao tipo de reação química ou devido à deposição de esporos (esporos são as sementes dos fungos) ou ainda devido à cor do próprio fungo, quando visível. (Verçoza 1991)

Ainda de acordo com Verçoza (1991), Cripto significa oculto. Em sentido restrito criptoflorescência é o crescimento de sais ou cristais no interior dos materiais. Esse crescimento ocasiona desagregação ou descolamento dos elementos construtivos. Nas alvenarias a criptoflorescência é causada pela etringita. A etringita, ou sal de Candlot, ou trissulfoaluminato de cálcio é um sal que se forma quando a umidade encontra condições propícias no interior da massa de cimento endurecido. Essas condições são sulfatos e aluminatos ainda não combinados, e isso é bastante comum também pode se formar quando há agregados reativos, vítreos, como a calcedônia, opala, etc. Em presença da umidade, há

uma reação álcali/agregado com formação de etringita sendo um sal muito expansivo, aumentando de volume à medida que se forma. Apresenta-se de início como um pó branco, mais brilhante que o carbonato com que se parece, e, em fases mais adiantadas forma um depósito vítreo, de alta resistência, insolúvel n'água e de difícil remoção. É comum que forme estalactites sob reservatórios ou lajes com infiltração. Quando cresce no interior do concreto inicialmente, o fissura e depois pode rompê-lo. Quando cresce dentro da argamassa de rejuntamento de tijolos ou blocos pode fazer a parede rachar ou até tombar. Nos rebocos produz inicialmente o descolamento e depois fissuramento e a queda.

2.1.1.2. Desagregamento

Segundo Freitas e Vicente (2019) o desagregamento se trata de um descascamento, porém juntamente com a película de tinta é removido também o reboco e pode ficar esfarelando. As circunstâncias para que isso aconteça podem ser: aplicação de tinta ou massa corrida sobre reboco não curado sobre parede com umidade ou sobre reboco muito arenoso. A massa de reboco feita com abundância de areia deixa o reboco fraco. Com o tempo, surge o descascamento junto com a tinta e massa corrida, soltam-se partes do reboco.

2.1.1.3. Saponificação

Saponificação: Segundo Freitas e Vicente (2019), quando existe umidade, pôde-se gerar “sabão” nas paredes, devido às reações álcalis que atacam grupos éster existentes na resina das tintas à base de óleo. Desta forma, a superfície fica com um aspecto viscoso e ocasionalmente uma característica oleosa. Consequentemente, a saponificação é proveniente da alcalinidade da cal e cimento que são os ingredientes existentes no reboco.

2.1.2. Fissuras e Trincas

As fissuras e trincas representam manifestações patológicas que podem indicar desde movimentações naturais dos materiais até problemas estruturais mais graves. Podem ocorrer devido a:

- *Movimentações estruturais;*
- *Retração dos materiais;*
- *Sobrecargas;*
- *Recalques diferenciais.*

Segundo Claudiano e Oliveira (2021), estas anomalias podem ser definidas e classificadas conforme a seguir:

Fissuras: As fissuras e trincas são falhas lineares, aparentes no reboco que acarreta um efeito estético nada agradável. No entanto, as fissuras são pequenas aberturas com espessuras inferiores a 0,5 mm e que originam perda parcial da convergência de superfícies sólidas.

Trincas: As trincas são mais profundas e notórias, superiores a 0,5 mm e inferior a 1,5 mm. Elas inclusive conseguem ser causadas por dilatações e contrações dos materiais referentes a diminuição de temperatura.

Rachaduras: São aberturas maiores que 1,5 mm, intensas e bem destacadas. É capaz de gerar corrosão da armadura ou reações químicas indesejáveis no material.

O Quadro 4, sua classificação, contém a classificação das aberturas de acordo com a sua espessura:

Quadro 4 – Tabela Referencial da espessura de abertura e sua classificação

Anomalias	Abertura (mm)
Fissura	Até 0,5
Trinca	De 0,5 a 1,5
Rachadura	De 1,50 a 5,0
Fenda	De 5,0 a 10,0

Fonte: Claudiano e Oliveira (2021)

2.1.3. Corrosão de Armaduras

Segundo Souza e Ripper (1998) a corrosão de armaduras em estruturas de concreto acontece em decorrência da destruição da película de passivação do aço, existente ao redor de toda a superfície exterior das barras que impede a dissolução do ferro pela elevada alcalinidade da solução aquosa existente no concreto e este processo eletroquímico é acelerado pela presença de agentes agressivos e falhas e proteção.

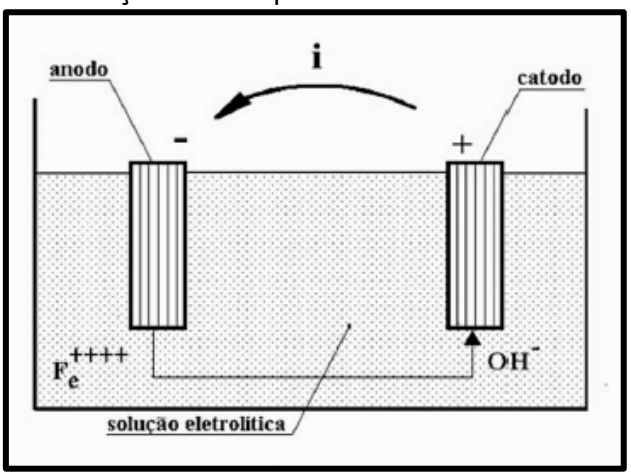
O pH do meio aquoso existente no interior do concreto é bastante alcalino (entre 12,6 e 14), como resultado da própria reação entre a água e os sais minerais que compõem o cimento.

Sempre que o nível de alcalinidade for superior a 9, estará garantida a criação da já referida película passivante, pelo contato entre a ferrugem superficial das barras e a água. O

processo de eletroquímico dá-se pela geração de um potencial elétrico, na presença de um eletrólito – no caso, a solução aquosa existente no concreto – em contato com um condutor metálico, a própria barra de aço. A passagem de átomos de ferro à superfície aquosa, transformando-se em cátions ferro (Fe++), com o consequente abandono da barra de aço à carga negativa, instalam a diferença de potencial. Desta forma, cria-se um efeito de pilha conforme a Figura 4, onde a corrosão instala-se pela geração de uma corrente elétrica dirigida do anodo para o catodo, através da água, e do catodo para o anodo, através da diferença de potencial.

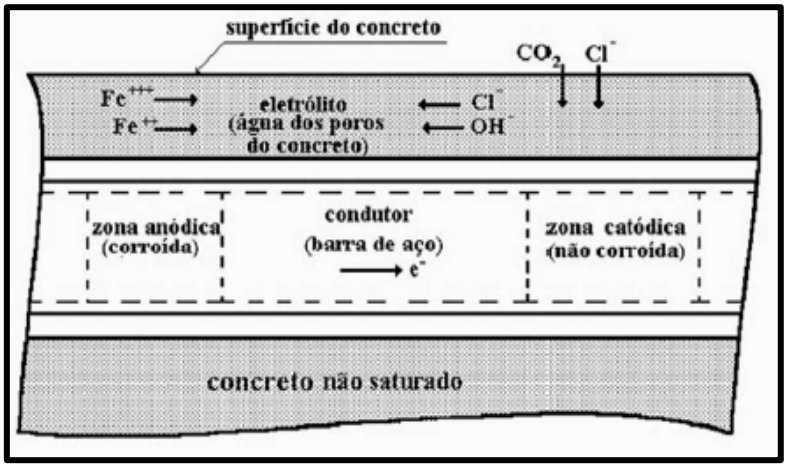
No caso do concreto armado, as regiões de menor concentração de O2 são as anódicas (ver Figura 5). Da combinação do cátion Fe++ com os ânions OH- resulta o hidróxido ferroso, de cor amarelada, depositado no anodo; no catodo deposita-se o hidróxido férrico, de cor avermelhada. Estes dois produtos constituem a ferrugem, evidência mais clara da corrosão do aço.

Figura 4 – Formação de semipilha em meio ao concreto armado



(Fonte: Souza e Ripper, 1998)

Figura 5 – Célula de Corrosão no meio concreto armado



(Fonte: Souza e Ripper, 1998)

Segundo Souza e Ripper (1998), com a diminuição da área de aço devido a corrosão da região periférica da barra, ocorre além da perda de aderência entre aço e concreto, a desagregação da camada de concreto, com a formação da camada de óxido de ferro hidratado (Fe2O3nH2O), que para ocupar o espaço, exerce uma pressão sobre o material de 15 MPa, suficiente para fraturar o concreto, esta expansão pode significar uma expansão volumétrica correspondente a 10 vezes o volume original.

As causas que permitem que este processo ocorra, podem ser químicos, falhas de execução e elaboração de projeto, e em decorrência de fatores ambientais ou uso.

2.1.3.4. Processos Químicos e Associados aos Materiais:

Carbonatação

A carbonatação, conforme Souza e Ripper (1998), resulta diretamente da ação dissolvente do anidrido carbônico (CO2), presente no ar atmosférico, sobre o cimento hidratado, com a formação do carbonato de cálcio e a consequente redução do pH do concreto até valores inferiores a 9. Quanto maior for concentração de CO2 presente, menor será o pH, ou, por outro lado, mais espessa será a camada de concreto carbonatada e em função da concentração de CO2 na atmosfera e da porosidade e nível de fissuração do concreto, a carbonatação pode atingir a armadura, quebrando o filme óxido que a protege, corroendo-a.

Ataque por Cloretos;

Uma das formas de despassivação do aço é pela ação de cloretos que podem penetrar no concreto por influência de ambientes agressivos ou terem sido introduzidos na massa durante o amassamento.

De acordo com Costa (2019), o cloreto que ingressa a matriz cimentícia pode se combinar química ou fisicamente aos produtos de hidratação do concreto, sendo um processo não expansivo e sem prejuízos a matriz. Apenas os íons cloro que se encontram livres podem contribuir para o início do processo de corrosão. Esse cloreto combinado pode estar adsorvido ao C-S-H ou na forma de sal de Friedel, obtido pela reação do monossulfato com o cloro livre. Os cloretos combinados não são completamente estáveis, já que quedas no pH para valores inferiores a 12,6 podem levar à dissolução do cloro combinado, liberando íons cloro que estavam quimicamente ligados ao C3A ou fisicamente ao C-S-H.

Desta forma a concentração de cloretos acima de certos limites provoca a despassivação da armadura, mesmo que o pH ainda seja alcalino. Algumas das principais fontes para a saturação de íons de cloreto podem ser; ambiente marinho, ambiente industrial, produtos de limpeza. A ocorrência de danos por sais solúveis depende dos seguintes fatores:

- *Microestrutura e resistência dos materiais;*
- *Condições do ambiente, em termos de temperatura do ar e umidade relativa do ar;*
- *Umidade e seu transporte nos materiais;*
- *Tipos e quantidade de sais presentes.*

Lixiviação;

Conforme Souza e Ripper (1998), a corrosão por lixiviação consiste na dissolução e arraste do hidróxido de cálcio existente na massa de cimento Portland endurecido (liberado na hidratação) devido ao ataque de águas puras ou com poucas impurezas, e ainda de águas pantanosas, subterrâneas, profundas ou ácidas, que serão responsáveis pela corrosão, sempre que puderem circular e renovar-se, diminuindo o pH do concreto. Quanto mais poroso o concreto, maior a intensidade da corrosão. A dissolução, o transporte e a deposição do hidróxido de cálcio Ca(OH)2 dão lugar à decomposição de outros hidratos, com o consequente aumento da porosidade do concreto que, com o tempo, se desintegra. Este fenômeno que

ocorre no concreto é similar à osteoporose do esqueleto humano, e pode levar, em um espaço de tempo relativamente curto, o elemento estrutural atacado à ruína.

2.1.3.5. Falhas de Execução e Elaboração de Projeto:

As falhas que comprometem a durabilidade das estruturas de concreto armado podem ser classificadas tanto em erros de concepção (elaboração) quanto em vícios construtivos (execução). A literatura aponta que uma abordagem casual no desenvolvimento de detalhes, tanto em elementos estruturais quanto não estruturais, é um fator determinante para a degradação localizada (Banafah e Mahmood, 2005). As principais falhas identificadas incluem:

- Inadequação do cobrimento: A falta de espessura suficiente da camada de concreto sobre a armadura é um erro recorrente, tanto em projeto quanto em execução, que reduz a proteção física do aço.
- Qualidade do concreto: A má qualidade do material utilizado, incluindo a baixa compacidade, facilita a penetração de agentes agressivos.
- Detalhamento deficiente: A falta de coordenação entre requisitos arquitetônicos e estruturais, bem como a negligência no desenvolvimento de detalhes "menores", resulta em vulnerabilidades que favorecem a patologia.
- Falhas em elementos de protensão: A presença de vazios e água em dutos de pontes protendidas, decorrentes de falhas na execução, permite a oxidação localizada de cabos e cordoalhas.

2.1.4. Degradação de Revestimentos

Entre essas manifestações, o desplacamento ou descolamento dos revestimentos destaca-se como uma das ocorrências mais relevantes devido ao risco de perda de funcionalidade, redução da vida útil e possibilidade de desprendimento de partes do revestimento. O desplacamento caracteriza-se pela perda de aderência entre as camadas constituintes do sistema de revestimento, podendo ocorrer entre o substrato e a argamassa de assentamento, entre a argamassa e o acabamento superficial ou ainda dentro da própria camada de revestimento. Esse fenômeno pode ser observado em diferentes sistemas, como revestimentos cerâmicos, argamassados, pinturas, sistemas de impermeabilização e revestimentos aderidos em fachadas (Cadore; Viecili; Arndt, 2024).

Nos revestimentos cerâmicos, especialmente aqueles aplicados em fachadas, os descolamentos estão frequentemente associados à incompatibilidade entre as deformações

dos materiais, variações térmicas, movimentações higroscópicas, falhas no preparo da base, utilização inadequada de argamassa colante e deficiências na execução. A exposição contínua das fachadas à radiação solar, chuva e variações de temperatura gera ciclos de expansão e retração que podem induzir tensões internas superiores à capacidade de aderência do sistema, levando ao surgimento de fissuras, perda de aderência e posterior desprendimento das placas (Carvalho e Fontenelle, 2021).

Outro fator importante é a presença de umidade, que pode atuar como agente acelerador da degradação dos revestimentos. A infiltração de água pode provocar alterações nas propriedades físicas dos materiais, favorecer processos de expansão, deterioração das interfaces de aderência e formação de depósitos salinos, contribuindo para a perda progressiva do desempenho do sistema (Souza; Souza; Reis, 2023).

Silva (2007), ao estudar fachadas com revestimentos argamassados em edifícios residenciais, observou que muitas das manifestações patológicas encontradas não estavam relacionadas apenas a falhas executivas, mas também à falta de manutenção preventiva dos sistemas construtivos. O autor destaca que problemas em calhas, lajes de cobertura, pingadeiras e sistemas de drenagem favorecem infiltrações que aceleram a degradação dos revestimentos e contribuem para sua perda de aderência.

Da mesma forma, Fioriti e Silva (2018), em estudo sobre revestimentos argamassados externos, identificaram que parte significativa das patologias observadas estava associada à ausência ou deficiência de manutenção durante a fase de uso das edificações. Os autores verificaram que a falta de inspeções periódicas dificulta a identificação precoce de fissuras e pontos de infiltração, permitindo que os mecanismos de deterioração avancem até comprometer a integridade do revestimento.

2.1.5. Problemas em Instalações Elétricas

As instalações elétricas prediais são sistemas essenciais para o funcionamento seguro e eficiente das edificações. Ao longo da vida útil da construção, esses sistemas estão sujeitos ao desgaste natural de seus componentes, às alterações de carga decorrentes das mudanças de uso dos ambientes e à ação de fatores ambientais. Nesse contexto, a manutenção preventiva assume papel fundamental na preservação do desempenho e da segurança das instalações. Quando inexistente ou inadequada, favorece o surgimento de manifestações

patológicas que podem comprometer o funcionamento do sistema e colocar em risco a integridade da edificação e de seus usuários.

De acordo com Rocha (2008), a manutenção preventiva em instalações elétricas é indispensável para garantir a segurança das edificações. O autor destaca que a ausência de inspeções periódicas em sistemas mais antigos pode ocasionar sobrecargas, curtos-circuitos e até perdas patrimoniais decorrentes de incêndios.

Outro aspecto relevante refere-se ao sistema de aterramento. A falta de manutenção ou de verificação periódica dos elementos de aterramento pode reduzir sua eficiência ao longo do tempo devido à corrosão, rompimento de conexões ou alterações das condições do solo. Como consequência, aumenta-se a vulnerabilidade da instalação a choques elétricos, falhas de equipamentos eletrônicos e surtos de tensão, comprometendo a segurança dos usuários e dos equipamentos conectados à rede elétrica. Segundo Lima (2013), a manutenção planejada dos componentes elétricos é fundamental para assegurar o desempenho adequado dos sistemas e reduzir os riscos decorrentes da degradação natural dos materiais.

Os quadros de distribuição também constituem elementos críticos das instalações elétricas. Esses equipamentos concentram dispositivos de proteção e manobra responsáveis pelo controle dos circuitos da edificação. A exposição prolongada à umidade, poeira, corrosão e variações térmicas pode comprometer o funcionamento dos componentes internos, reduzindo sua capacidade de proteção. Rocha (2008) destaca que a falta de inspeções periódicas nos quadros elétricos favorece a deterioração dos dispositivos de proteção, aumentando a probabilidade de falhas e acidentes elétricos.

Outro componente sujeito ao desgaste acelerado são os disjuntores termomagnéticos e dispositivos diferenciais residuais (DR). Embora projetados para operar durante longos períodos, esses equipamentos sofrem desgaste mecânico decorrente das operações de abertura e fechamento, além do envelhecimento natural de seus mecanismos internos. Conforme apontado por Lima (2013), a verificação periódica desses dispositivos é indispensável para assegurar seu correto funcionamento em situações de sobrecarga, curto-circuito ou fuga de corrente, garantindo a proteção dos usuários e da instalação.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho trata-se de uma pesquisa de campo, evidenciando estudo de caso a respeito da degradação de uma edificação, encontrados na inspeção visual da edificação Residencial Maranguape. Sendo correlacionadas às principais manifestações patológicas existentes na construção, os mecanismos de ocorrência.

Para a realização desta pesquisa, adotou-se uma metodologia seguindo as diretrizes estabelecidas pelas normas técnicas vigentes, em especial a NBR 16747:2020 (ABNT, 2020), buscando avaliar as condições técnicas, funcionais e de conservação da edificação, identificando anomalias, falhas de manutenção, manifestações patológicas e potenciais riscos à segurança, à habitabilidade e ao desempenho dos sistemas construtivos.

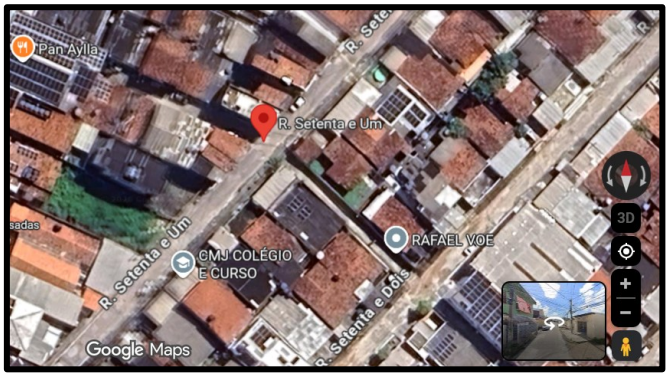
Inicialmente realizou-se a etapa de coleta e análise documentos, procurando procurando-se levantar informações sobre as características construtivas, e possíveis não conformidades relacionadas a ausência e falhas de manutenção. Esta etapa foi comprometida, devido a falta de documentos relacionados aos projetos, memoriais descritivos, manuais de uso e operação, relatórios de inspeções anteriores e registros de intervenções executadas anteriormente.

Posteriormente foi realizada uma vistoria (in loco), inspecionando visualmente e sensorialmente a condição das instalações prediais, avaliando elementos estruturais, sistemas de impermeabilização, instalações hidráulicas e sanitárias, instalações elétricas, coberturas, fachadas, esquadrias e áreas comuns da edificação.

Após a análise de campo, os dados obtidos foram organizados e analisados, buscando identificar as principais causas e mecanismos envolvidos nos processos das anomalias e manifestações patológicas encontradas.

No caso apresentado neste trabalho, serão abordadas as principais manifestações patológicas associadas aos sistemas hidrossanitários e seus impactos nos aspectos estruturais, estéticos e funcionais à edificação Residencial Maranguape, localizada no bairro de Maranguape I, Paulista - PE. Abaixo segue a localização do empreendimento (Figura 6). A Figura 7 apresenta fachada do Residencial Maranguape.

Figura 6 – Localização do Residencial Maranguape



Fonte: Google Maps

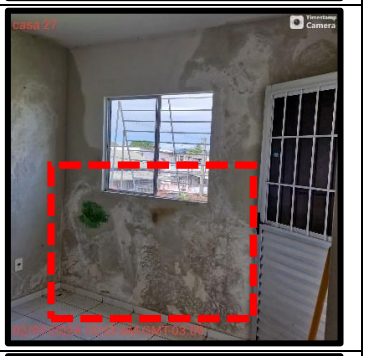
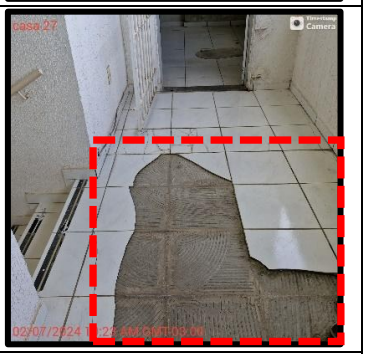
Figura 7 - Fachada Leste do Residencial Maranguape

Fonte: Autores

O Residencial Maranguape é um Bloco do Tipo Caixão, com 04 (quatro) unidades residenciais. Cada unidade residencial tem 62,68m² de área privativa e 69,67m² de área total. Construído em tijolos cerâmicos de 8 furos. O empreendimento objeto de pesquisa faz parte do processo judicial que tramitou na 5ª Vara da Justiça Federal de Pernambuco. Nos autos consta a informação do Habite-se de 03/02/2016, e foi construído pela construtora JB EASY Empreendimentos Ltda. A proprietária adquiriu o imóvel em 2016 e no ano de 2019 iniciaram as manifestações patológicas. As quais serão descritas abaixo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. IDENTIFICAÇÃO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ENCONTRADAS EM VISITA TÉCNICA

ID	Danos e Não Conformidades	Causa	Registro Fotográfico
01	Desplacamento do revestimento da superfície e manchas de mofo na parede interna	Falta de manutenção da fachada da edificação	
02	Mofo na parede interna apresentando em caráter avançado e desplacamento de revestimento da superfície.	Falta de manutenção da fachada da edificação	
03	Bolor	Infiltração oriundo da cobertura	
04	Desplacamento e Quebra do piso cerâmico	Desnível da laje do piso.	
05	Fissuras e Alinhadas Identificadas na fachada	Em decorrência da existência de recalque diferencial	

ID	Danos e Não Conformidades	Causa	Registro Fotográfico
06	Caixa de gordura próxima da edificação com vazamentos	Falta de manutenção preventiva e corretiva	
07	Caixa de gordura próxima da edificação com vazamentos	Falta de manutenção preventiva e corretiva	
08	Fissuras Mapeadas na Fachada da Edificação	Recalque diferencial	
09	Bolor e pintura degradada	Falta de manutenção preventiva e corretiva	

4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A inspeção visual realizada nos ambientes da edificação permitiu identificar diferentes manifestações patológicas relacionadas à degradação dos revestimentos e principalmente à presença de umidade.

As ocorrências observadas evidenciam a influência da ausência de manutenção preventiva e corretiva, bem como a ação contínua de agentes externos que comprometem o desempenho e a durabilidade dos sistemas construtivos.

Desplacamento e Manchas de Umidade e presença de Bolor

O desplacamento do revestimento associado à presença de manchas de mofo em parede interna. A origem do problema foi atribuída à falta de manutenção da fachada da edificação, condição que possibilitou a infiltrações através de fissuras, falhas de vedação e degradação dos elementos de proteção externos.

A presença contínua de umidade favoreceu a deterioração da aderência entre o revestimento e o substrato, resultando no destacamento da camada superficial. O ambiente úmido criou condições favoráveis para a proliferação de fungos e microrganismos, evidenciados pelas manchas de mofo observadas na superfície.

A evolução da manifestação patológica demonstra que a ausência de intervenções preventivas permitiu o agravamento progressivo dos danos, comprometendo tanto a estética quanto a salubridade do ambiente.

Manchas de Umidade

Na segunda ocorrência verifica-se um estágio mais avançado do processo identificado na Manifestação 01. A extensa área afetada pelo mofo indica a permanência prolongada da umidade no interior do sistema construtivo.

O avanço da degradação sugere que a água infiltrada promoveu sucessivos ciclos de umedecimento e secagem, reduzindo gradativamente a resistência mecânica dos materiais.

Além do comprometimento do revestimento, essa condição pode afetar a qualidade do ar interno e contribuir para problemas de saúde dos usuários devido à presença de fungos e bolores.

Infiltrações da Cobertura

A terceira manifestação caracteriza-se pela presença de bolor no teto e em áreas adjacentes, tendo como origem uma infiltração proveniente da cobertura da edificação.

A infiltração pode estar associada à deterioração do sistema de impermeabilização, falhas nas telhas ou demais elementos responsáveis pela estanqueidade da cobertura.

Embora a manifestação observada seja predominantemente superficial, a persistência da infiltração pode ocasionar danos mais severos, como desprendimento de pintura, desplacamento de revestimentos e degradação de componentes estruturais.

Degradação do Revestimento Cerâmico do Piso

A quarta ocorrência corresponde ao desplacamento e à ruptura de placas cerâmicas do piso, cuja origem foi associada ao desnível da laje de piso.

A presença de placas quebradas e soltas indica que o sistema de revestimento já se encontra comprometido estruturalmente. Além de afetar a funcionalidade e a estética do ambiente, essa manifestação representa risco à segurança dos usuários devido à possibilidade de acidentes causados por tropeços ou desprendimento das peças.

Fissuras na Fachada em decorrência do Recalque

A manifestação observada consiste na presença de fissuras alinhadas distribuídas ao longo da fachada da edificação. Conforme indicado na inspeção, a origem provável está relacionada à ocorrência de recalque diferencial das fundações.

O recalque diferencial em diferentes pontos da estrutura apresenta deslocamentos verticais distintos, gerando esforços adicionais nos elementos de vedação. Como consequência, surgem fissuras que geralmente seguem trajetórias contínuas e bem definidas, acompanhando regiões de maior concentração de tensões.

As fissuras identificadas indicam que a movimentação da estrutura ultrapassou a capacidade de deformação dos revestimentos e alvenarias. Além do comprometimento estético, essas aberturas facilitam a infiltração de água, acelerando processos de degradação dos revestimentos e favorecendo o surgimento de outras manifestações patológicas, como umidade, mofo e desplacamentos.

Vazamentos das Caixas de Gordura e Inspeção

Na área externa da edificação foi identificada caixa de gordura apresentando sinais de vazamento e extravasamento de efluentes. A origem do problema foi associada à falta de manutenção preventiva e corretiva do sistema hidrossanitário.

O acúmulo de resíduos gordurosos reduz a capacidade de funcionamento da caixa, provocando obstruções e comprometendo o escoamento adequado dos efluentes. Como consequência, ocorre o extravasamento do sistema e a saturação do solo.

Adicionalmente, a permanência de efluentes na superfície favorece a proliferação de microrganismos, gera odores desagradáveis e compromete as condições de higiene do local.

Além dos impactos sanitários, os vazamentos podem promover o aumento da umidade nas fundações e elementos próximos, contribuem para a deterioração dos materiais e

favorecem processos de recalque a longo prazo. A condição observada demonstra a necessidade de limpeza periódica e monitoramento contínuo do sistema.

4.3. RECOMENDAÇÕES E PRINCIPAIS TÉCNICAS CORRETIVAS

Para a revitalização do empreendimento devem ser aplicadas algumas técnicas corretivas como:

Ajuste do sistema de esgotamento sanitário, caixas de gordura e inspeção, onde o mesmo encontrava-se com infiltrações no solo e vazamentos como pode ser visto nas Fotos 06 e 07. Onde sugere-se o afastamento das caixas da base do prédio, projeto atualizando o sistema de esgotamento sanitário e revisão das instalações hidráulicas, eliminando os vazamentos.

Análise do estado tanto do solo na periferia do empreendimento, como das fundações do Residencial Maranguape. Considerando um projeto de recuperação estrutural conforme o tipo de empreendimento, solo e materiais utilizados na fundação.

Revitalização das fachadas, com a retirada da pintura, recuperação das fissuras e trincas, aplicação de selante nas esquadrias, aplicação de nova pintura.

Revitalização da coberta com a aplicação de impermeabilização da laje da coberta, e recomposição de telhas e refazimento de calhas e rufos.

5. CONCLUSÃO

De forma geral, as manifestações patológicas identificadas demonstram que a ausência de manutenção preventiva constitui um dos principais fatores responsáveis pelo agravamento dos danos observados. Os problemas de infiltração associados à fachada e à cobertura permitiram a ação contínua da umidade sobre os materiais, resultando em mofo, bolor e perda de aderência dos revestimentos.

As manifestações patológicas analisadas evidenciam dois mecanismos principais de degradação da edificação: os recalques diferenciais e a deficiência de manutenção predial. As fissuras observadas na fachada indicam movimentações estruturais capazes de comprometer os sistemas de vedação e favorecer a entrada de água na edificação. Paralelamente, os problemas relacionados à caixa de gordura e à degradação dos revestimentos demonstram a ausência de ações preventivas capazes de preservar o desempenho dos sistemas hidrossanitários e dos acabamentos externos.

Observa-se ainda que diversas patologias apresentam relação direta entre si. A infiltração de água através de fissuras e revestimentos degradados potencializa o surgimento de bolor e acelera o processo de deterioração dos materiais. Da mesma forma, vazamentos persistentes podem contribuir para alterações das condições do solo e intensificar problemas de movimentação diferencial da estrutura.

Dessa forma, é possível afirmar que a adoção de um plano sistemático de inspeção e manutenção predial, poderia ter possibilitado a identificação precoce dessas anomalias, reduzindo os custos de reparo e evitando a evolução dos danos para estágios mais severos. Portanto, as anomalias observadas evidenciam a importância da manutenção preventiva como ferramenta essencial para a preservação da durabilidade, do desempenho e da segurança das edificações.

Conclui-se que nenhuma estrutura tem Vida Útil de Projeto com a máxima eficiência sem considerar as manutenções preventivas periódicas e corretivas. Além do uso correto e eficiente do empreendimento, considerando as referências apresentadas no Manual do Proprietário de utilização, materiais a serem considerados e técnicas de manutenção.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2024 (a)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5674: Manutenção de edificações — Requisitos para o sistema de gestão de manutenção. Rio de Janeiro: ABNT, 2024. (b)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9575: Impermeabilização – Seleção e projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16747: Inspeção predial — Diretrizes, conceitos, terminologia e procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

BANAFAH A. M. and MAHMOOD K., “Influence if design and construction details on localized degradation of concrete structures”. Scotland, UK. 2005, doi: 10.1680/rarocs.34051.0005

BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. R. L. Patologia de estruturas. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

CADORE, B. C.; VIECILI, M. J. C.; ARNDT, J. Manifestações patológicas em revestimento argamassado de fachada em edifício residencial: estudo de caso. Congresso Brasileiro de Patologia das Construções (CBPAT), 2024. doi: 10.5281/zenodo.13144145.

CARVALHO, F. E.; FONTENELLE, A. M. Manifestações patológicas de revestimentos cerâmicos em fachadas: um estudo de caso. Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos.

COSTA, L. C. B. Desempenho de concretos de escória de aciaria frente a ataque de cloretos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019. Disponível em: http://www.propec.ufop.br/uploads/propec_2022/teses/arquivos/2019-dissertacao-desempenhoconcretosescoria.pdf. Acesso em: 18 jun. 2026.

CLAUDIANO, J. L. P.; OLIVEIRA, R. F. Estudo de caso das manifestações patológicas na construção civil com ênfase no Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV). Revista GETEC, [s. l.], v. 10, n. 26, 2021. Disponível em: https://revistas.fucamp.edu.br/index.php/getec/article/view/2366. Acesso em: 18 jun. 2026.

FIORITI, C. F.; SILVA, A. M. Mapeamento de manifestações patológicas em revestimentos argamassados externos de edifícios de múltiplos pavimentos. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil, 2018. doi: 10.5216/reec.v15i2.52140.

FREITAS, T. T. S.; VICENTE, G. C. Análise das técnicas de impermeabilização aplicadas em edificações – Estudo de caso de uma edificação residencial no Município de João Monlevade, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/123456789/3120>.

LIMA, M. T. S. Planejamento e organização das atividades de manutenção em instalações elétricas prediais e seus componentes. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 2013.

LONZETTI, F. B. Impermeabilizações em subsolos de edificações residenciais e comerciais. 2010. 59 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/26039. Acesso em: 18 jun. 2026.

NEVES, M. Manifestações patológicas e tratamentos de infiltração em revestimentos. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário, [S. l.], 2021.

NETO, F. M. Mercado Imobiliário 100 mistérios. Belo Horizonte - 2013. Volume 2. Primeira Edição.

OLIVEIRA, L. A. A.; NUNES, L. A. S. Estudo da infiltração por umidade ascendente em residências unifamiliares. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, [S. l.], 2020.

OLIVEIRA, D. F. O Conceito de Qualidade Aliado às Patologias na Construção Civil. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

POZZOBON, C. E. Notas de aulas da disciplina de construção civil II. Santa Catarina, 2007.

ROCHA, H. F. Importância da manutenção predial preventiva. Holos, Natal, v. 2, p. 72-77, 2008.

SILVA, A. F. Manifestações patológicas em fachadas com revestimentos argamassados: estudo de caso em edifícios em Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

SILVA, F. L.; OLIVEIRA, M. P. S. L. Manifestações patológicas causadas pela ausência ou falha de impermeabilização. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, [s. l.], ano 3, ed. 11, v. 1, p. 76-95, nov. 2018. Disponível em: nucleodoconhecimento.com.br. Acesso em: 18 jun. 2026.

SOUZA, V. C., RIPPER T. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto – São Paulo: Pini, 1998.

SOUZA, M. O. de; SOUZA, L. C. de; REIS, M. B. dos. Manifestações patológicas em revestimentos cerâmicos aplicados em ambientes internos: um estudo de caso. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 279–301, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.51891/rease.v9i2.8413. Acesso em: 18 jun. 2026.

VERÇOZA, Ênio José. Patologia das edificações. Porto Alegre: Sagra, 1991.

CAPÍTULO VI

ELABORAÇÃO DE PLANO DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS À LUZ DA LEGISLAÇÃO AMBIENTAL VIGENTE: ESTUDO DE CASO EM EMPRESA DE RETÍFICA

PREPARATION OF AN INDUSTRIAL SOLID WASTE MANAGEMENT PLAN IN LIGHT OF CURRENT ENVIRONMENTAL LEGISLATION: A CASE STUDY IN A RECONDITIONING COMPANY

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-6

Jéssica De Oliveira Rocha [1]
Danielle Lourenço Ferreira [2]
Anna Alice Soares Pereira [3]
Eliana Cristina Barreto Monteiro [4]
Ângelo Just da Costa Silva [5]

[1] Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP ORCID 0009-0007-5056-9210
[2] Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP ORCID 0009-0003-9508-5982
[3] Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP ORCID 0009-0009-7886-1269
[4] Profa. Pós-graduação, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP e Universidade de Pernambuco – UPE. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0842-779X.
[5] Prof. Pós-graduação, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP e Universidade de Pernambuco – UPE. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0759-6439.

RESUMO

O Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais (PGRSI) constitui instrumento técnico de planejamento, controle e rastreabilidade destinado a organizar as etapas de geração, identificação, classificação, segregação, acondicionamento, armazenamento, transporte e destinação final dos resíduos provenientes de atividades industriais. Este capítulo analisa a elaboração do PGRSI da CROMART Retífica Ltda., empreendimento localizado no bairro de Afogados, Recife/PE, tomando como referência o diagnóstico realizado para a vigência 2026-2027 e sua aderência ao marco regulatório aplicável. O estudo foi desenvolvido como pesquisa aplicada, descritiva, documental e estudo de caso, com análise do plano elaborado, do inventário de resíduos e dos procedimentos de gerenciamento adotados. Foram identificados resíduos não perigosos, como sucata de metais ferrosos e papel/papelão, e resíduos perigosos associados ao processo químico e ao tratamento de efluentes, incluindo recipientes com resíduos de soluções decapantes, embalagens de ácido crômico e lodo semissólido contendo cromo. A análise foi fundamentada na Lei Federal nº 12.305/2010, no Decreto nº 10.936/2022, na Resolução CONAMA nº 313/2002, na Portaria MMA nº 280/2020, na Política Estadual de Resíduos Sólidos de Pernambuco e nas ABNT NBR 10004-1:2024 e 10004-2:2024. Os resultados demonstram que a estruturação do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais - PGRSI permite integrar controle operacional, prevenção de riscos, rastreabilidade e comprovação da destinação, além de evidenciar oportunidades de melhoria relacionadas à atualização contínua da classificação, à documentação da cadeia de destinação e à minimização na fonte. Conclui-se que o PGRSI, quando construído a partir do diagnóstico real do processo produtivo e articulado às obrigações legais, ultrapassa a função documental e se consolida como instrumento de conformidade e gestão ambiental.

Palavras-chave: PGRSI, Resíduos perigosos, Conformidade ambiental, Retífica.

ABSTRACT

The Industrial Solid Waste Management Plan (PGRSI) is a technical instrument for planning, control and traceability designed to organize the stages of generation, identification, classification, segregation, packaging, storage, transport and destination of waste from industrial activities. This chapter analyzes the preparation of the PGRSI for CROMART Retífica Ltda., located in Afogados, Recife, Pernambuco, Brazil, based on the 2026-2027 diagnosis and its adherence to the applicable regulatory framework. The research was developed as an applied, descriptive and documentary case study, based on the prepared plan, the waste inventory and the adopted management procedures. Non-hazardous waste, such as ferrous metal scrap and paper/cardboard, and hazardous waste related to chemical processes and industrial wastewater treatment were identified, including containers with pickling-solution residues, chromic-acid packaging and chromium-bearing semi-solid sludge. The analysis considered Federal Law No. 12,305/2010, Decree No. 10,936/2022, CONAMA Resolution No. 313/2002, MMA Ordinance No. 280/2020, the Pernambuco State Solid Waste Policy, and ABNT NBR 10004-1:2024 and 10004-2:2024. The results show that a structured PGRSI integrates operational control, risk prevention, traceability and evidence of proper destination, while revealing opportunities for continuous improvement in classification, documentation and source reduction. The study concludes that a PGRSI based on the actual production process and linked to legal obligations goes beyond a documentary requirement and becomes an environmental compliance and management instrument.

Keywords: PGRSI, Hazardous waste, Environmental compliance, Reconditioning industry.

1. INTRODUÇÃO

O gerenciamento de resíduos sólidos industriais é componente essencial da gestão ambiental porque conecta as características do processo produtivo às medidas necessárias para prevenir poluição, reduzir riscos e assegurar que cada fluxo residual receba tratamento e destinação compatíveis com suas propriedades. Em atividades industriais que utilizam substâncias químicas e processos de tratamento de superfícies, essa necessidade torna-se ainda mais relevante em razão da possibilidade de geração de resíduos contendo metais e compostos corrosivos ou tóxicos.

No ordenamento jurídico brasileiro, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010 e regulamentada pelo Decreto nº 10.936/2022, estabelece princípios, objetivos, instrumentos e responsabilidades para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos. Entre seus elementos centrais estão a hierarquia de não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos resíduos, bem como a responsabilidade do gerador pelo gerenciamento dos resíduos decorrentes de sua atividade.

Para os geradores de resíduos industriais, o plano de gerenciamento constitui instrumento particularmente relevante porque transforma requisitos legais e normativos em procedimentos operacionais verificáveis. O PGRSI deve ser coerente com a realidade do

empreendimento, contemplando origem, características, quantidades, formas de acondicionamento e armazenamento, responsabilidades, transporte, tratamento, destinação, ações preventivas e mecanismos de controle e rastreabilidade.

A atualização normativa da ABNT NBR 10004, publicada em 2024 em duas partes, também repercute diretamente na elaboração de planos industriais. A ABNT NBR 10004-1:2024 estabelece os requisitos do processo de classificação quanto à periculosidade, enquanto a ABNT NBR 10004-2:2024 organiza o Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR). A nova estrutura exige que a classificação seja sustentada por informações sobre origem, composição e características de perigo, reforçando a necessidade de coerência entre diagnóstico, classificação e decisão de gerenciamento.

Nesse contexto, o presente capítulo utiliza como estudo de caso o PGRSI elaborado para a CROMART Retífica Ltda., localizada em Recife/PE. O plano analisado possui vigência 2026-2027 e foi elaborado a partir do levantamento das fontes geradoras e dos resíduos associados às atividades do empreendimento. O caso é relevante por reunir resíduos não perigosos valorizáveis e resíduos perigosos associados ao emprego de compostos de cromo, soluções decapantes e ao tratamento físico-químico do efluente industrial.

O objetivo deste estudo é analisar tecnicamente a elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais da CROMART Retífica Ltda., verificando sua articulação com a legislação ambiental e as normas técnicas vigentes, com ênfase no diagnóstico, classificação, segregação, acondicionamento, armazenamento, transporte, rastreabilidade e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos gerados. Busca-se: caracterizar o empreendimento e os principais fluxos de resíduos identificados; relacionar as medidas previstas no PGRSI às exigências legais e normativas aplicáveis; discutir os mecanismos de controle e rastreabilidade; e identificar pontos de melhoria capazes de fortalecer a prevenção, a minimização na fonte e a conformidade ambiental.

2. FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICO-LEGAL

2.1. POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS E OBRIGAÇÃO DE GERENCIAMENTO

A Lei nº 12.305/2010 constitui o eixo estruturante da gestão de resíduos sólidos no país. Para fins de gerenciamento, é indispensável distinguir destinação final ambientalmente adequada de disposição final ambientalmente adequada: a primeira abrange alternativas

como reutilização, reciclagem, recuperação e outras formas admitidas pelos órgãos competentes, enquanto a disposição final se refere à distribuição ordenada de rejeitos em locais apropriados, observadas as normas operacionais específicas. Essa distinção evita que materiais com potencial de aproveitamento sejam tratados automaticamente como rejeitos.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) inclui os geradores de resíduos industriais entre os sujeitos obrigados à elaboração de plano de gerenciamento de resíduos sólidos. O conteúdo do plano deve refletir a natureza da atividade e os resíduos gerados, e sua existência não afasta a responsabilidade do gerador por danos decorrentes de gerenciamento inadequado. O Decreto nº 10.936/2022 regulamenta a política e reforça a integração dos instrumentos de planejamento, informação, logística reversa e controle.

No estudo de caso, essa lógica é aplicada ao separar resíduos passíveis de reaproveitamento ou coleta convencional daqueles que, em razão de suas características, requerem gerenciamento diferenciado. A segregação na fonte, a identificação do responsável pela coleta e destinação e a manutenção de registros constituem, portanto, elementos de conformidade e não apenas rotinas internas.

2.2. INVENTÁRIO, MTR E RASTREABILIDADE

A Resolução CONAMA nº 313/2002 dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais e determina controle específico dos resíduos existentes ou gerados por atividades industriais como parte integrante do processo de licenciamento ambiental. O inventário reúne informações sobre geração, características, armazenamento, transporte, tratamento, reutilização, reciclagem, recuperação e disposição final.

A Portaria MMA nº 280/2020 instituiu o Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) Nacional e disciplinou instrumentos eletrônicos de rastreabilidade no âmbito do Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR). O sistema nacional informa que as indústrias devem reportar, até 31 de março de cada ano, informações complementares às declaradas nos MTR relativas ao ano anterior para composição do Inventário Nacional. Desse modo, o Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais (PGRSI) deve dialogar com registros efetivos de movimentação e destinação, reduzindo divergências entre o documento de planejamento e a operação real.

No PGRSI analisado, as quantidades apresentadas no inventário são vinculadas aos registros de MTR, e o documento prevê controle de geração, armazenamento e destinação

final. Essa prática fortalece a auditabilidade do sistema, desde que os manifestos, certificados de destinação e licenças dos prestadores permaneçam atualizados e conciliados com os registros internos.

2.3. CLASSIFICAÇÃO CONFORME A ABNT NBR 10004:2024

A edição de 2024 da ABNT NBR 10004 representa atualização relevante em relação à versão de 2004. A Parte 1 estabelece requisitos para a classificação de resíduos quanto à periculosidade, e a Parte 2 estrutura o SGCR. A classificação deve considerar o enquadramento do resíduo, a possível presença de poluentes orgânicos persistentes, perigos físico-químicos e infectocontagiosos e toxicidade, conforme aplicável.

A terminologia atual organiza os resíduos em Classe 1 - perigosos e Classe 2 - não perigosos. A antiga subdivisão dos não perigosos em Classe II A - não inertes e Classe II B - inertes, característica da edição de 2004, não deve ser utilizada como se constituísse o núcleo do sistema de classificação de 2024. Quando necessária uma avaliação de inércia para fins específicos, ela deve ser tratada de acordo com o requisito técnico aplicável, sem confundir essa caracterização com a classificação quanto à periculosidade.

Para o caso estudado, a classificação deve ser sustentada pelo conhecimento do processo gerador e pela composição dos resíduos. A presença de soluções ácidas e compostos de cromo justifica atenção especial aos critérios de corrosividade e toxicidade. Em situações nas quais a composição ou as características não sejam suficientemente conhecidas, recomenda-se que a classificação seja respaldada por laudo técnico e, quando necessário, por caracterização analítica.

2.4. TRANSPORTE, ARMAZENAMENTO E RESPONSABILIDADE NA CADEIA

O transporte externo de resíduos requer compatibilidade entre a classificação do resíduo e as regras aplicáveis à carga. Quando o resíduo também se enquadrar como produto perigoso para fins de transporte, incidem as exigências da Resolução ANTT nº 5.998/2022 e suas alterações, incluindo condições de acondicionamento, identificação, documentação, sinalização e requisitos operacionais. A classificação ambiental do resíduo e a classificação para transporte possuem finalidades distintas e devem ser avaliadas de forma articulada.

O armazenamento temporário deve prevenir vazamentos, contato incompatível entre substâncias, exposição às intempéries, acesso indevido e dispersão de contaminantes. Para resíduos perigosos, o PGRSI deve prever recipientes compatíveis, identificação, piso

impermeável e medidas de contenção proporcionais ao risco. A contratação de terceiros licenciados não transfere automaticamente ao gerador toda a responsabilidade pelo gerenciamento, razão pela qual a verificação documental dos prestadores e da destinação deve integrar a rotina de controle.

2.5. MARCO ESTADUAL APLICÁVEL EM PERNAMBUCO

No âmbito estadual, a Lei nº 14.236/2010 institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos de Pernambuco e estabelece diretrizes para gestão e gerenciamento, prevenção da poluição, redução da geração, reutilização, reciclagem e destinação ambientalmente adequada. Para empreendimentos situados no Estado, o PGRSI deve ainda observar condicionantes de licenciamento e procedimentos estabelecidos pelo órgão ambiental competente, além das exigências municipais pertinentes.

Assim, a conformidade do plano não se esgota na citação de normas. Ela depende da demonstração de que os procedimentos previstos são executáveis, documentados e compatíveis com as licenças do empreendimento, dos transportadores e dos destinadores.

3. METODOLOGIA

O trabalho caracteriza-se como pesquisa aplicada, de natureza descritiva e documental, desenvolvida por meio de estudo de caso. A unidade de análise foi o PGRSI elaborado para a CROMART Retífica Ltda., com vigência 2026-2027. Foram considerados os dados de caracterização do empreendimento, diagnóstico das fontes geradoras, identificação e classificação dos resíduos, inventário, procedimentos de segregação, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte, destinação e registros de rastreabilidade constantes do plano.

A análise foi organizada em quatro etapas. Na primeira, procedeu-se à caracterização do empreendimento e à identificação dos processos com potencial de geração de resíduos. Na segunda, os fluxos residuais registrados no PGRSI foram sistematizados segundo origem, estado físico, periculosidade e forma de gerenciamento. Na terceira, os procedimentos descritos no plano foram confrontados com o marco técnico-legal aplicável. Na quarta, foram identificados pontos de aderência e oportunidades de aprimoramento, especialmente quanto à atualização normativa, rastreabilidade, controle documental e minimização na fonte.

Os quantitativos apresentados neste capítulo correspondem aos registros e estimativas constantes do PGRSI. Não foram produzidos novos ensaios laboratoriais para esta

análise. Assim, quando a caracterização de periculosidade depende da composição química, a discussão é fundamentada no processo gerador e nas informações técnicas registradas no plano, sem substituir eventual laudo de classificação exigível para situações específicas.

4. CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO E DO PGRSI

A CROMART Retífica Ltda.-ME está instalada na Rua São Miguel, nº 651, bairro de Afogados, Recife/PE, em área construída informada de 235 m². O PGRSI analisado foi elaborado para a vigência 2026-2027 e identifica como responsável técnica Jéssica de Oliveira Rocha, Engenheira Ambiental e Sanitarista, com registro profissional e Anotação de Responsabilidade Técnica indicados no documento.

O diagnóstico demonstra que o gerenciamento de resíduos está diretamente associado às atividades metalúrgicas e aos processos que utilizam produtos químicos, bem como ao sistema de tratamento de efluentes industriais. O plano registra que o efluente industrial tratado é recirculado e reutilizado no processo produtivo, operando em circuito fechado, enquanto o tratamento físico-químico gera lodo semissólido denominada borra de cromo.

O documento também registra prestadores externos para resíduos perigosos e para a higienização de panos industriais reutilizáveis. A substituição de estopas descartáveis contaminadas por panos reutilizáveis constitui medida de prevenção e redução na fonte, pois evita a geração recorrente de um fluxo de resíduo contaminado que demandaria gerenciamento como perigoso.

5. DIAGNÓSTICO DOS RESÍDUOS GERADOS

5.1. RESÍDUOS NÃO PERIGOSOS

O PGRSI identifica como principais resíduos não perigosos a sucata de metais ferrosos e os resíduos de papel e papelão. A sucata metálica é associada ao código A004 da Resolução CONAMA nº 313/2002 e é direcionada ao reaproveitamento. Papel e papelão são associados ao código A006 e encaminhados ao sistema de coleta urbana. A segregação desses materiais evita sua contaminação por substâncias químicas e preserva o potencial de valorização. A classificação e as características dos resíduos não perigosos identificados estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação dos resíduos conforme ABNT NBR 10004-1:2024 e ABNT NBR 10004-2:2024.

RESÍDUO CLASSE II - CONFORME ABNT NBR 10004-1:2024 e ABNT NBR 10004-2/2024			
Código de Identificação	**Resíduo**	**Constituinte Perigoso**	**Características de Periculosidade**
A004 A006	Sucata de metais ferrosos Resíduo de papel e papelão	Não perigosos Não perigosos	não se aplica não se aplica

Fonte: Autor (2026).

5.2. RESÍDUOS PERIGOSOS

Os fluxos de maior relevância ambiental são aqueles associados a soluções decapantes e compostos de cromo. O PGRSI registra bombonas com resíduos de soluções decapantes, latas de ácido crômico lavadas e lodo semissólido oriundo do tratamento de efluentes industriais. O plano atribui periculosidade por corrosividade às soluções ácidas e por toxicidade e/ou corrosividade aos resíduos contendo cromo.

A borra de cromo merece destaque por resultar diretamente do sistema físico-químico de tratamento. Embora o tratamento reduza a carga presente na fase líquida e possibilite a recirculação do efluente tratado, os contaminantes removidos são concentrados no lodo. Portanto, a eficiência do tratamento da água não elimina a necessidade de gerenciamento rigoroso do resíduo sólido gerado; ao contrário, transfere a massa de contaminantes para uma fase que precisa ser acondicionada, armazenada, transportada e destinada de modo controlado. A classificação dos resíduos perigosos identificados, bem como seus constituintes e respectivas características de periculosidade, está apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação dos resíduos conforme ABNT NBR 10004-1:2024 e ABNT NBR 10004-2:2024.

RESÍDUO CLASSE I - PERIGOSO- CONFORME ABNT NBR 10004-1:2024 e ABNT NBR 10004-2:2024			
Código de Identificação	**Resíduo**	**Constituinte Perigoso**	**Características de Periculosidade**
D002	Bombonas com resíduos de soluções decapantes	Ácidos fortes (HCl, H_2SO_4)	Corrosividade
D009	Latas de ácido crômico (lavadas)	Compostos de cromo (Cr^{3+} / Cr^{6+})	Toxicidade, corrosividade
D009	Lodo (borra de cromo) do tratamento de efluentes industriais	Cromo e metais associados	Toxicidade

Fonte: Autor (2026).

5.3. QUANTIFICAÇÃO E INVENTÁRIO

A geração dos resíduos industriais apresenta variação em função da demanda produtiva e das condições operacionais do empreendimento. Conforme o PGRSI, estima-se a geração aproximada de 14 latas por ano e 6 bombonas por ano, enquanto a quantidade de borra de cromo está diretamente relacionada à operação do sistema de tratamento de efluentes industriais.

O acompanhamento dos quantitativos gerados é realizado por meio dos registros internos e dos Manifestos de Transporte de Resíduos (MTR), permitindo manter a rastreabilidade das etapas de coleta, transporte e destinação. A consolidação dessas informações no inventário possibilita acompanhar a geração ao longo do tempo e fornece subsídios para o controle operacional, a atualização periódica do PGRSI e o monitoramento do desempenho ambiental do empreendimento.

6. PROCEDIMENTOS DE GERENCIAMENTO ADOTADOS

6.1. SEGREGAÇÃO E MANUSEIO

O plano prevê segregação no ponto de geração segundo natureza e periculosidade. Essa prática é tecnicamente adequada porque reduz contaminação cruzada, evita que resíduos valorizáveis sejam convertidos em resíduos de maior complexidade e facilita a seleção do recipiente e da rota de destinação. O manuseio deve permanecer associado a procedimentos operacionais, treinamento e equipamentos de proteção compatíveis com os riscos químicos envolvidos.

6.2. ACONDICIONAMENTO E ARMAZENAMENTO TEMPORÁRIO

Segundo o PGRSI, os resíduos perigosos são acondicionados em bombonas e recipientes apropriados, dispostos sobre paletes, identificados e mantidos em área coberta com piso de concreto. Como o empreendimento não dispõe de central de resíduos, o armazenamento é temporário, setorizado e controlado nos pontos definidos. Para fortalecer esse arranjo, recomenda-se verificar periodicamente integridade dos recipientes, compatibilidade química, rotulagem, contenção de vazamentos, acesso controlado e disponibilidade de resposta a emergências.

6.3. TRANSPORTE E DESTINAÇÃO

O PGRSI identifica empresas licenciadas para coleta e destinação de resíduos perigosos e registra o uso do MTR para rastreabilidade. Para o período analisado, a Stericycle Gestão Ambiental Ltda. é indicada como prestadora para resíduos perigosos, enquanto a B-Green Gestão Ambiental Ltda. também consta entre os prestadores identificados. O plano informa blendagem para coprocessamento como rota de tratamento/destinação para determinados resíduos perigosos. A manutenção das licenças, autorizações e certificados de destinação deve ser verificada a cada contratação e movimentação, pois a validade documental é dinâmica.

6.4. MINIMIZAÇÃO NA FONTE

A substituição de estopas contaminadas por panos industriais reutilizáveis, higienizados por empresa especializada, é a medida de prevenção mais claramente documentada no PGRSI. A ação se alinha à hierarquia da PNRS porque atua antes da etapa de tratamento ou disposição. Para avaliar sua efetividade, recomenda-se manter indicador simples, como número de panos reutilizados, massa estimada de estopas evitada e frequência de higienização, permitindo demonstrar ganho ambiental ao longo do tempo.

7. ANÁLISE DE CONFORMIDADE TÉCNICO-LEGAL

A análise de conformidade técnico-legal do PGRSI foi realizada considerando os principais requisitos aplicáveis ao gerenciamento dos resíduos sólidos industriais, abrangendo as etapas de identificação e classificação, segregação, acondicionamento e armazenamento, transporte e destinação final. Foram consideradas, ainda, as evidências apresentadas no Plano e as medidas necessárias à manutenção e ao aprimoramento da conformidade ambiental do empreendimento.

A avaliação permite verificar a aderência das práticas de gerenciamento adotadas aos requisitos legais e técnicos aplicáveis, bem como identificar aspectos que demandam acompanhamento, atualização documental ou melhoria contínua. A síntese da análise de conformidade, contemplando os aspectos avaliados, a respectiva base técnico-legal, as evidências identificadas no PGRSI e as recomendações de melhoria, é apresentada no Quadro 3.

Quadro 3 – Análise de conformidade técnico-legal do PGRSI.

Aspecto	Base técnico-legal	Evidência no PGRSI	Avaliação / melhoria
Existência de PGRSI	Lei 12.305/2010; Decreto 10.936/2022	Plano elaborado para 2026-2027	Aderente; manter atualização conforme alterações de processo e licenciamento
Inventário industrial	CONAMA 313/2002; Portaria MMA 280/2020	Tabela de inventário e referência aos MTR	Aderente; manter consolidação periódica dos registros e rastreabilidade por MTR.
Classificação	ABNT NBR 10004-1:2024 e 10004-2:2024	Identificação de resíduos perigosos e não perigosos	Aderente à ABNT NBR 10004:2024; manter os registros técnicos de classificação.
Segregação	PNRS; procedimentos técnicos	Segregação na fonte por natureza e perigo	Aderente; manter treinamento e inspeções
Armazenamento	Normas técnicas aplicáveis	Recipientes, paletes, área coberta e piso de concreto	Aderente; manter inspeções periódicas das condições de acondicionamento e armazenamento.
Transporte	MTR; ANTT 5.998/2022 quando aplicável	Prestadores e MTR identificados	Verificar enquadramento para transporte de produto perigoso e validade documental
Destinação	Lei 12.305/2010; licenciamento	Destinação por empresa licenciada; coprocessamento indicado	Manter CDF/comprovantes e conferir compatibilidade da licença com cada resíduo
Minimização	Hierarquia da PNRS	Panos reutilizáveis em substituição às estopas	Boa prática de redução na fonte, alinhada à hierarquia da PNRS.

Fonte: Autor (2026).

A análise evidencia aderência conceitual do PGRSI aos principais elementos de gerenciamento exigidos pela PNRS: identificação dos resíduos, segregação, acondicionamento, armazenamento, definição de responsáveis externos e destinação. O uso de registros de Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) como fonte para o inventário também é coerente com o modelo de rastreabilidade adotado pelo O Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR).

A análise técnico-normativa do PGRSI considera a ABNT NBR 10004:2024, incorporando os critérios e procedimentos vigentes para a classificação dos resíduos sólidos

quanto à periculosidade. Nesse contexto, os resíduos identificados no empreendimento são avaliados considerando sua origem, processo gerador, composição e características de perigo, subsidiando a definição das condições adequadas de segregação, acondicionamento, armazenamento, transporte e destinação.

A quantificação dos resíduos constitui instrumento de acompanhamento do desempenho ambiental do empreendimento. Como a geração pode variar em função da demanda produtiva e das condições operacionais, o acompanhamento periódico dos quantitativos permite estabelecer um histórico de geração. Os registros internos, associados aos Manifestos de Transporte de Resíduos (MTR) e aos documentos comprobatórios de destinação, contribuem para a rastreabilidade e para a atualização periódica do PGRSI.

A rastreabilidade deve abranger toda a cadeia: gerador, transportador, receptor, tecnologia de tratamento e comprovação da destinação. A simples indicação de empresa contratada não é suficiente se a licença estiver vencida ou se não abranger o resíduo específico. Por isso, o controle documental deve incluir verificação de validade e escopo das licenças antes da remessa, além da guarda do MTR e do certificado correspondente.

Para os resíduos contendo cromo, a abordagem preventiva deve ser mais rigorosa. O conhecimento do processo sustenta a identificação de perigo, mas a gestão deve preservar documentação técnica sobre composição, fichas de segurança dos insumos, histórico do processo e, quando aplicável, laudo de classificação. Essa documentação é especialmente importante se houver mudança de matéria-prima, concentração, processo químico ou rota de tratamento.

8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O estudo de caso demonstra que o PGRSI constitui um instrumento de planejamento e controle ambiental, pois organiza o gerenciamento dos resíduos de acordo com as características do processo produtivo e dos fluxos efetivamente gerados. No empreendimento analisado, o plano contempla a identificação e classificação dos resíduos, segregação, acondicionamento, armazenamento temporário, transporte, rastreabilidade e destinação ambientalmente adequada.

A classificação dos resíduos, fundamentada na ABNT NBR 10004:2024, permite estabelecer procedimentos compatíveis com suas características de periculosidade. Para os resíduos não perigosos, como a sucata de metais ferrosos, priorizam-se a segregação e o

reaproveitamento. Já os resíduos associados às soluções decapantes, aos compostos de cromo e à borra proveniente do tratamento de efluentes requerem gerenciamento diferenciado, considerando os riscos associados às suas características.

Outro aspecto relevante é o tratamento físico-químico e a recirculação do efluente industrial tratado no processo produtivo, reduzindo a necessidade de descarte da fase líquida. Nesse sistema, a borra de cromo gerada durante o tratamento é gerenciada separadamente, com acondicionamento, armazenamento temporário, rastreabilidade e encaminhamento para destinação ambientalmente adequada.

O PGRSI também contempla medidas de redução na fonte, destacando-se a substituição de estopas descartáveis contaminadas por panos industriais reutilizáveis. Essa prática está alinhada à hierarquia estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, ao priorizar ações de prevenção e redução da geração.

A utilização do Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) e dos documentos comprobatórios de destinação complementa o controle interno e permite acompanhar a movimentação dos resíduos até o destinador. Dessa forma, a integração entre classificação, segregação, controle quantitativo, armazenamento, transporte e destinação evidencia a função do PGRSI como instrumento de gestão, rastreabilidade e conformidade ambiental, contribuindo para o gerenciamento adequado dos resíduos e para a melhoria contínua das práticas adotadas pelo empreendimento.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise técnica do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais da CROMART Retífica Ltda. permitiu verificar sua articulação com a legislação ambiental e com as normas técnicas aplicáveis, considerando as características do processo produtivo e as diferentes etapas envolvidas no gerenciamento dos resíduos. O estudo demonstrou que o PGRSI constitui instrumento de planejamento e controle ambiental ao sistematizar o diagnóstico, a classificação, a segregação, o acondicionamento, o armazenamento, o transporte, a rastreabilidade e a destinação final dos resíduos gerados.

Quanto à caracterização do empreendimento e dos principais fluxos de resíduos, foram identificados resíduos não perigosos passíveis de valorização, com destaque para sucatas de metais ferrosos e papel e papelão, bem como resíduos perigosos associados às soluções decapantes, aos compostos de cromo e ao lodo semi sólido gerado no tratamento

físico-químico dos efluentes industriais. A distinção entre esses fluxos possibilita estabelecer formas de gerenciamento compatíveis com suas características e riscos.

Em relação à conformidade técnico-legal, verificou-se que as medidas previstas no PGRSI apresentam aderência aos principais instrumentos legais e normativos considerados no estudo, especialmente à Política Nacional de Resíduos Sólidos e aos critérios de classificação estabelecidos pela ABNT NBR 10004:2024. A segregação na fonte, o acondicionamento diferenciado, o armazenamento temporário, a contratação de prestadores habilitados e a definição das formas de destinação constituem elementos que contribuem para o atendimento das responsabilidades atribuídas ao gerador.

No que se refere aos mecanismos de controle e rastreabilidade, a utilização dos registros de geração, dos Manifestos de Transporte de Resíduos (MTR) e dos documentos comprobatórios de destinação permite acompanhar a movimentação dos resíduos desde sua geração até o destinador. A consolidação periódica dessas informações também fornece subsídios para o acompanhamento dos quantitativos gerados, para a atualização do inventário e para as revisões periódicas do PGRSI.

A análise também permitiu identificar oportunidades de aprimoramento, especialmente quanto à manutenção e atualização dos registros técnicos de classificação dos resíduos; à verificação periódica das condições de acondicionamento e armazenamento; ao controle da validade e do escopo das licenças dos transportadores e destinadores; à manutenção dos MTR e respectivos comprovantes de destinação; e ao desenvolvimento de indicadores que permitam mensurar os resultados das ações de minimização na fonte. Nesse aspecto, destaca-se a substituição de estopas descartáveis contaminadas por panos industriais reutilizáveis, prática já adotada pelo empreendimento e alinhada à prevenção e à redução da geração de resíduos.

Conclui-se, portanto, que o PGRSI analisado apresenta estrutura compatível com o gerenciamento dos resíduos identificados e aderência aos principais requisitos técnico-legais considerados no estudo, devendo sua efetividade ser sustentada pela atualização contínua das informações, pela manutenção da rastreabilidade documental e pelo acompanhamento das oportunidades de melhoria identificadas. Dessa forma, o Plano ultrapassa sua função meramente documental e se consolida como instrumento de prevenção, minimização na fonte, controle operacional e conformidade ambiental.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004-1:2024: Resíduos sólidos - Classificação - Parte 1: Requisitos de classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004-2:2024: Resíduos sólidos - Classificação - Parte 2: Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR). Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BARTHOLOMEU, D. B.; CAIXETA-FILHO, J. V. Logística ambiental de resíduos sólidos. São Paulo: Atlas, 2011.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997. Dispõe sobre procedimentos e critérios utilizados no licenciamento ambiental.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 275, de 25 de abril de 2001. Estabelece código de cores para diferentes tipos de resíduos na coleta seletiva.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 313, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Portaria nº 280, de 29 de junho de 2020. Regulamenta o Manifesto de Transporte de Resíduos - MTR Nacional e instrumentos associados no SINIR.

BRASIL. Agência Nacional de Transportes Terrestres. Resolução nº 5.998, de 3 de novembro de 2022. Atualiza o Regulamento para o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos e aprova suas Instruções Complementares.

CALDERONI, S. Os bilhões perdidos no lixo. 4. ed. São Paulo: Humanitas, 2003.

DIAS, R. Gestão ambiental: responsabilidade social e sustentabilidade. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

LEITE, P. R. Logística reversa: sustentabilidade e competitividade. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

PERNAMBUCO. Lei nº 14.236, de 13 de dezembro de 2010. Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá outras providências.

PHILIPPI JR., A.; ROMÉRO, M. A.; BRUNA, G. C. Curso de gestão ambiental. Barueri: Manole, 2004.

SOUZA, A. C.; BROLEZE, F. M. Práticas e percepções quanto ao gerenciamento de resíduos sólidos industriais no estado de Santa Catarina. Revista Brasileira de Educação Ambiental, v. 14, n. 4, p. 386-404, 2019.

TACHIZAWA, T. Gestão ambiental e responsabilidade social corporativa. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2015.

CAPÍTULO VII

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS CONJUNTOS HABITACIONAIS DE INTERESSE SOCIAL NA CIDADE DO RECIFE-PE: DEGRADAÇÃO E SEUS IMPACTOS NA HABITABILIDADE

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SOCIAL HOUSING ESTATES IN RECIFE-PE, BRAZIL: DEGRADATION AND ITS IMPACTS ON HABITABILITY

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-7

Priscila Raffi Rodrigues [1]

[1] Autora, Professora na Faculdade de Ciências Humanas (ESUDA) em Recife-PE e Mestre em Engenharia Civil pela Universidade de Pernambuco (POLI-UPE), Orcid.org/0000-0003-1852-629X

RESUMO

A carência de pesquisas sobre a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) predial em edifícios de Habitações de Interesse Social (HIS) em Recife-PE motivou este estudo, que analisa a degradação e seus impactos na habitabilidade e no ambiente urbano. O objetivo geral consistiu em avaliar a vida útil estimada de conjuntos habitacionais na cidade, aprofundando a análise no caso mais crítico (CH 05) por meio de engenharia diagnóstica, Avaliação Pós-Ocupação (APO) e do Método dos Fatores. Os resultados revelaram que todos os conjuntos vistoriados se encontram abaixo da vida útil projetada e da referência normativa de 50 anos para estruturas (ABNT NBR 6118:2014). Enquanto o CH 01 aproximou-se da idade ideal esperada, o CH 05 distanciou-se severamente, registrando uma Vida Útil Estimada Atual (Vuea) global de 18,58 anos devido ao acentuado desgaste e à falta de manutenção. Constatou-se, ademais, que os hábitos dos moradores não são os únicos responsáveis pela degradação precoce, evidenciando falhas projetuais e estruturais persistentes. Conclui-se que a integração da ACV ao Método dos Fatores constitui uma ferramenta metodológica eficiente e em conformidade com as diretrizes da ISO 14.040 para a gestão predial de HIS.

Palavras-chave: Ciclo de vida. Avaliação pós-ocupação. Habitação de interesse social. Método dos fatores. Degradação. Habitabilidade.

ABSTRACT

The scarcity of research on building Life Cycle Assessment (LCA) in Social Housing (SH) developments in Recife, Brazil, motivated this study, which analyzes degradation and its impacts on habitability and the urban environment. The general objective was to evaluate the estimated service life of social housing estates in the city, delving deeper into the most critical case (CH 05) through diagnostic engineering, Post-Occupancy Evaluation (POE), and the Factor Method. The results revealed that all inspected housing estates presented a service life inferior to the projected benchmark and the 50-year normative reference for structures, according to ABNT NBR 6118:2014. While CH 01 approached the expected ideal age, CH 05 deviated severely, registering a current estimated service life (Vuea) of 18.58 years due to severe wear and lack of maintenance. Furthermore, it was observed that residents' habits and behaviors are not the sole factors responsible for the premature reduction of service life, highlighting persistent design and structural flaws. It is concluded that the integration of LCA with the Factor Method constitutes an efficient and effective methodological tool, in compliance with ISO 14040 guidelines, for the management of social housing buildings.

Keywords: Life cycle assessment. Post-occupancy evaluation. Social housing. Factor method. Degradation. Habitability.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a formação das Habitações de Interesse Social (HIS) remonta a um histórico de urbanização periférica como já dizia Rolnick (1981) impulsionado pela autoconstrução e por marcos legais como a Lei do Inquilinato (Lei nº 8.245/1991). Apesar dos avanços em tipologias habitacionais nas últimas décadas, a gestão, a manutenção e a fiscalização dessas edificações por parte dos órgãos públicos ainda carecem de uniformidade e de estruturas adequadas (Lessa, 2010).

No âmbito regional, pesquisas em Pernambuco sobre o tema têm abordado a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e a estimativa de vida útil por meio do Método dos Fatores (MF), a exemplo dos trabalhos de Zarzar Júnior (2007), Couto (2014) e Silva (2016). No que tange especificamente à ACV, destacam-se as contribuições de Trajano (2010) e Santos (2012) — que mapeou o consumo energético e emissões de CO_2 na produção de blocos cerâmicos para HIS — e Porto (2025), que aplicou a Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACV-S) voltada aos operários. Contudo, nenhuma dessas investigações analisou de forma integrada a degradação e os impactos na habitabilidade e socioambientais para a vida dos moradores e do entorno.

Esse cenário evidencia a necessidade de avaliar o Ciclo de Vida de HIS em Recife-PE, considerando as modificações promovidas pelos usuários, visto que a manutenção e a fiscalização representam desafios crescentes para as gestões municipais. Essa problemática repercute diretamente na qualidade da habitação e desdobra-se em danos estruturais, materiais, prejuízos à saúde psicofisiológica dos ocupantes e deterioração do entorno urbano. A relevância da temática acentua-se ao constatar que as falhas de uso e manutenção respondem por cerca de 66% das causas de acidentes em edificações com mais de 30 anos, enquanto os vícios construtivos e de projeto representam os 34% restantes (IBAPE-SP, 2021).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo geral analisar e avaliar a vida útil estimada de Conjuntos Habitacionais de Interesse Social (HIS) em Recife-PE, integrando o desempenho da edificação, as condições de uso, a manutenção predial e a avaliação pós-ocupação. Com essa abordagem multidisciplinar e sistêmica, busca-se compreender a relação entre degradação, habitabilidade e segurança predial, contribuindo para o avanço das discussões sobre a gestão do ciclo de vida de HIS em centros urbanos.

2. ESTRUTURA E OBJETIVOS DA PESQUISA

Para alcançar os objetivos propostos — focado em identificar as relações entre o comportamento dos moradores, a vida útil da edificação, o estado de degradação e os impactos na habitabilidade —, a pesquisa foi estruturada em cinco partes: introdução, revisão bibliográfica, metodologia, resultados e conclusão. O percurso metodológico adotou uma abordagem quali-quantitativa, com a realização de visitas técnicas, levantamento fotográfico preservando a identidade dos participantes e aplicação de questionários de Avaliação Pós-Ocupação (APO) para diagnosticar patologias, alterações projetuais e dificuldades dos usuários.

Para atender aos fins do estudo, a investigação desdobrou-se em três etapas centrais: 1) o diagnóstico das manifestações patológicas e conflitos decorrentes de reformas, adaptabilidade e falta de manutenção; 2) o cálculo da vida útil das edificações por meio do Método dos Fatores associado à APO; e 3) a análise do ciclo de vida dos conjuntos habitacionais para a seleção daquele com maior comprometimento, visando o aprofundamento da degradação e de seus impactos sociais. Destaca-se que a coleta de dados foi precedida pela apresentação do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), assegurando os padrões éticos, o anonimato e a participação voluntária.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta breve revisão buscou-se analisar o que evoluiu na teoria até a atualidade desde que a pesquisa foi realizada como resultado da dissertação de mestrado realizada em 2017, com oito (08) estudos de caso, intitulada: Avaliação do ciclo de vida na fase de uso dos conjuntos habitacionais de interesse social na cidade do recife/PE: sua vida útil estimada.

3.1. A EVOLUÇÃO DAS HABITAÇÕES SOCIAIS NO BRASIL E A AVALIAÇÃO PÓS OCUPAÇÃO DAS MESMAS.

A evolução do debate habitacional brasileiro, desde estudos clássicos como os de Rolnik (1981) até revisões sistemáticas recentes sobre Avaliação Pós-Ocupação (APO) realizadas por Accioli et al. (2021), evidencia que a habitação passou a ser tratada como uma questão pública de forma relativamente tardia no país. Durante décadas, os padrões habitacionais foram predominantemente orientados por normas e legislações locais, com limitada padronização e escassez de instrumentos voltados à avaliação da qualidade e do desempenho das unidades habitacionais.

Com o passar dos anos, observa-se uma extensa produção bibliográfica voltada às questões políticas, econômicas e sociais relacionadas à habitação, porém com menor ênfase nos aspectos projetuais, tipológicos e espaciais das unidades habitacionais. Mais recentemente, estudos de caso desenvolvidos em diferentes contextos internacionais passaram a investigar a relação entre os leiautes residenciais e as atividades desempenhadas pelos moradores, buscando compreender como a organização espacial influencia o uso, o desempenho e a adaptação das habitações ao longo do tempo (Artayasa, 2021; Liu et al., 2022).

Esses estudos demonstram que a análise dos fluxos de atividades e das interações entre usuários e ambiente construído constitui um importante instrumento para a avaliação do desempenho habitacional, reforçando as contribuições da Avaliação Pós-Ocupação na compreensão das relações entre ambiente e comportamento dos usuários (Barbosa et al., 2025). Neste contexto de evolução dos conceitos habitacionais, observa-se uma mudança significativa na compreensão da Habitação de Interesse Social (HIS) ao longo das últimas décadas. O Plano Diretor do Recife definia HIS como toda moradia destinada à população de baixa renda que dispusesse de requisitos mínimos de habitabilidade, incluindo dois quartos, sala, cozinha, área de serviço e banheiro (Recife, 2008).

Com a revisão do Plano Diretor e a instituição da Política Municipal de Habitação de Interesse Social, o conceito passou a incorporar uma abordagem mais ampla, compreendendo a habitação como instrumento de garantia do direito à moradia adequada e articulando aspectos urbanísticos, fundiários, sociais, ambientais e de infraestrutura urbana (Recife, 2021). Essa evolução aproxima-se das diretrizes internacionais da ONU-Habitat, que compreendem a moradia adequada como um direito humano fundamental, associado não apenas ao abrigo físico, mas também à segurança, acessibilidade, infraestrutura, saúde, bem-estar e integração social (UN-Habitat, 2023).

Já a Norma Brasileira de Desempenho de Edificações Habitacionais (ABNT NBR 15575:2024) reforça que a qualidade habitacional deve ser avaliada a partir do desempenho em uso, considerando requisitos de segurança, habitabilidade, sustentabilidade e durabilidade durante a vida útil da edificação. Embora os avanços normativos tenham ampliado o entendimento sobre qualidade habitacional, ainda permanecem lacunas relacionadas à integração entre desempenho construtivo, comportamento dos usuários, manutenção predial e estimativa da vida útil das edificações, especialmente em habitações de

interesse social. Essa limitação evidencia a necessidade de aplicar abordagens mais abrangentes para compreender os fatores que influenciam o desempenho das edificações ao longo de sua fase de uso.

Abordagens que já existem desde Ornstein (1992), como sua Avaliação Pós-ocupação (APO), e mostra que esta visa avaliar o ambiente construído (habitação) a partir da avaliação de fatores técnicos, funcionais, econômicos, estéticos e comportamentais do ambiente em uso tendo em vista tanto a opinião dos técnicos, projetistas e clientes como também dos usuários, diagnosticar aspectos positivos e negativos. Além dos indicadores socioeconômicos e urbanísticos, torna-se necessário incorporar parâmetros relacionados ao desempenho da edificação, à percepção dos usuários, à manutenção, à adaptabilidade dos espaços e à gestão do ciclo de vida.

Essa perspectiva aproxima-se das discussões contemporâneas sobre gestão do ciclo de vida das edificações, nas quais a APO deixa de ser apenas uma ferramenta de avaliação da satisfação dos usuários e passa a atuar como instrumento de apoio à tomada de decisão, ao planejamento da manutenção, à melhoria do desempenho e à retroalimentação dos processos de projeto e gestão predial (AL Mughairi et al., 2023). Deste modo, observa-se que os instrumentos de Avaliação Pós-Ocupação podem ser compatibilizados com as ferramentas da engenharia diagnóstica e da Avaliação do Ciclo de Vida, permitindo integrar informações técnicas, funcionais, ambientais e comportamentais.

Essa convergência metodológica possibilita uma compreensão mais abrangente dos fatores que influenciam a durabilidade e degradação das edificações, e contribui para a construção de modelos de avaliação capazes de apoiar a gestão do desempenho ao longo da vida útil das habitações de interesse social. Especialmente em contextos caracterizados por restrições orçamentárias e limitações institucionais, como ocorre em grande parte dos programas habitacionais brasileiros. Com isso pode-se compatibilizar os instrumentos de Avaliação Pós Ocupação com os instrumentos e ferramentas da engenharia diagnóstica, aplicando a abordagem qualitativa da APO com a abordagem quantitativa do método dos fatores (MF) para avaliação do ciclo de vida aplicado à realidade brasileira e mantendo os princípios normativos.

3.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A avaliação da vida útil de uma edificação se dá a partir do somatório da vida útil de seus materiais e componentes. O método é usado para informar as decisões na seleção de materiais para melhor compreender, avaliar e reduzir impactos ambientais, pelo que é por vezes referido como Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ambiental. Procedimentos de ACV estão descritos nas normas internacionais ISO 14040 (2009) à ISO 14044 (2009). Segundo Glass et al. (2013), a ACV é:

> "[...] o processo de avaliação dos efeitos que um produto tem no ambiente ao longo de todo o período de seu ciclo de vida [...], como extração e processamento, fabricação, transporte e distribuição, utilização, reutilização e manutenção". (Glass et al. 2013).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) consolidou-se como uma das principais ferramentas para análise dos impactos associados às edificações ao longo de todo o seu ciclo de vida. Inicialmente aplicada predominantemente à avaliação ambiental de materiais e sistemas construtivos, a ACV passou a incorporar abordagens mais abrangentes, incluindo aspectos econômicos, sociais e operacionais relacionados à fase de uso das edificações (Rezaei; Bulle; Lesage, 2022; Porto, 2025).

Nessa abordagem, a edificação passa a ser analisada como um sistema integrado, considerando os impactos decorrentes da extração de matérias-primas, produção dos materiais, construção, operação, manutenção, reabilitação e fim de vida útil. Conforme já observado desde Carvalho Filho (2001), essa visão amplia a compreensão da edificação para além de seus componentes isolados, permitindo sua avaliação como produto final inserido em um ciclo contínuo de transformação e uso. Visto a complexidade de avaliar a degradação de um edifício e seus impactos, são necessárias realizações de anamnese e diagnóstico para predição mais precisa. Dessa forma, a Avaliação Pós-ocupação (APO) entra como ferramenta para auxiliar à uma anamnese mais ampla, e para complementar o diagnóstico da ACV e do Método dos Fatores fechando a tríade da avaliação sistêmica.

Paralelamente, a evolução das pesquisas em ACV ampliou o foco das análises tradicionalmente concentradas nos impactos ambientais dos materiais e sistemas construtivos. Estudos recentes passaram a incorporar aspectos relacionados ao desempenho operacional, à manutenção, ao comportamento dos usuários e à vida útil das edificações, reconhecendo que a fase de uso representa parcela significativa dos impactos acumulados ao

longo do ciclo de vida dos edifícios e influencia diretamente seu desempenho e durabilidade (Scherrz et al., 2023).

3.2.1. Adaptação para o contexto das habitações no Brasil

No Brasil é importante levar em consideração a política habitacional e as diferenças entre regiões e situação econômica. Estas dificultam a padronização e aplicação dos mesmos modelos de outros países, esta diversidade precisa ser levada em conta ao realizar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Avaliação Pós-Ocupação (APO) e desempenho de edificações. Outra evidência é a ampliação progressiva da compreensão sobre os fatores que influenciam a durabilidade do ambiente construído devido às alterações realizadas pelos moradores. Revisões sistemáticas recentes indicam que os estudos passaram a incorporar, além das características dos materiais e sistemas construtivos, aspectos relacionados ao comportamento dos usuários, à adaptabilidade dos espaços, à manutenção e à gestão da fase de uso das edificações (Porto, 2025).

Para a realização deste estudo, foi adotada a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida, conforme princípios e estrutura estabelecidos pela NBR ISO 14.040:2010. Tendo em vista a natureza qualiquantitativa proposta para essa pesquisa, e o caráter peculiar das regiões brasileiras em específico a pernambucana, buscou-se após, o conhecimento do estado da arte desde 2017 apresentado e atualizado no referencial teórico, mantendo a integridade histórica do método originalmente aplicado. Agregar valor por meio da inovação, desenvolver uma abordagem integrada capaz de compatibilizar diferentes instrumentos de avaliação aplicados à fase de uso das edificações.

Foi realizada a personalização da metodologia utilizando os instrumentos de campo: a) Questionário de Avaliação Pós-ocupação, b) o checklist de Inspeção Predial – tomando como base o proposto pelo IBAPE/SP; e c) o questionário do modelo matemático Método dos Fatores para depois tratar e calcular através da ferramenta Excel.

3.2.2. O Método dos Fatores

Entre os modelos teóricos utilizados para previsão da vida útil destaca-se o Método dos Fatores (MF), modelo matemático amplamente difundido a partir da série ISO 15686, destinada ao planejamento da vida útil das edificações. O método parte do princípio de que a vida útil de um componente ou sistema construtivo pode ser estimada a partir da adaptação

de uma Vida Útil de Referência (VUR) para condições específicas de uso, exposição ambiental, qualidade de execução, manutenção e operação (ISO, 2010; ISO, 2021).

Exemplo da aplicação desse modelo em Recife, foi apresentado por Zarzar (2007), que utilizou o Método dos Fatores para estimar a vida útil de estruturas de concreto submetidas a processos de degradação prematura. Os resultados demonstraram aderência satisfatória a situações observadas em campo, evidenciando o potencial do método como ferramenta de apoio à previsão de desempenho e durabilidade. Em particular, os seguintes itens que foram considerados: i) uso geral do método pelos projetistas; ii) precisão esperada e confiabilidade do método; iii) possibilidades para os projetistas avaliarem os valores necessários da vida útil de referência (VUR) e os Fatores de A a G como mostra o Quadro 1 logo abaixo.

Quadro 1 - Fatores modificadores usados pela Norma ISO 15686-1 (2000)

Factor A	**Qualidade do produto da construção**	Representa a qualidade dos materiais ou componentes, nas condições em que são fornecidos à obra, segundo especificações do projetista.
Factor B	**Nível de qualidade do projeto**	Exprime o nível de qualidade do projeto. Esse fator tem a ver com a adequação da escolha de uma solução construtiva específica, das medidas de proteção previstas, etc.
Factor C	**Nível de qualidade da execução**	Refere-se à qualidade da execução. A avaliação desde fator deverá refletir o grau de confiança da mão de obra, mas também a existência ou não de uma fiscalização rigorosa.
Factor D	**Características do ambiente interior**	Refere-se às características do ambiente interior.
Factor E	**Características do ambiente exterior**	Refere-se às características do ambiente exterior.
Factor F	**Características do uso**	Reflete o efeito do uso na degradação do material ou componente.
Factor G	**Nível de manutenção**	Refere-se à manutenção e deve dar conta da probabilidade da existência de uma manutenção adequada.

Fonte: Autoria própria (2017).

Embora originalmente desenvolvido para estimativas de durabilidade de componentes construtivos, o Método dos Fatores (MF) passou a ser utilizado em pesquisas relacionadas à gestão do ciclo de vida das edificações, planejamento da manutenção e avaliação do desempenho em uso. Sua permanência na literatura especializada deve-se à simplicidade operacional, ao baixo custo de aplicação e à capacidade de apoiar processos de tomada de decisão em contextos nos quais informações detalhadas de monitoramento de longo prazo ainda são limitadas. Tais características tornam o método particularmente relevante para estudos aplicados à habitação de interesse social, nos quais frequentemente existem

restrições de banco de dados de desempenho, históricos de manutenção ainda restrito, descontinuidade do inventário do ciclo de vida, limitações de recursos financeiros e dos programas sistemáticos de manutenção.

Além disso, a crescente aproximação entre os conceitos de vida útil, desempenho e manutenção, reforçada pela ABNT NBR 15575:2024, amplia a relevância do MF como instrumento de apoio à gestão do desempenho das edificações ao longo de seu ciclo de vida. Nessa perspectiva, a estimativa da vida útil deixa de representar apenas um indicador de durabilidade física e passa a constituir uma ferramenta de planejamento capaz de subsidiar ações preventivas, programas de manutenção e estratégias de conservação do ambiente construído. Os valores sugeridos para os fatores modificadores utilizados neste estudo estão apresentados no Quadro 2 a seguir.

Quadro 2 :Valores sugeridos pela ISO 15686–1 (2006) para o desvio da condição de referência

Valor	Desvio em relação à condição de referência
0,8	Quando o fator tem uma influência negativa sobre o elemento em estudo.
1,0	Quando o fator não apresenta desvio em relação à condição de referência.
1,2	Quando o fator tem influência positiva sobre o elemento em estudo.

Fonte: Adaptado de ISO 15686-1 (2006).

4. METODOLOGIA

A construção da metodologia desta pesquisa ocorreu em 2017 de maneira interdisciplinar, tomando como base estudos e documentos normativos disponíveis na literatura à época, como Carvalho Filho (2001), Matos (2007), Gomide et al (2014), a ABNT NBR ISO 14040:2009, referente à gestão ambiental e avaliação do ciclo de vida — princípios e estrutura, Ornstein (1992), a ABNT NBR 6118:2014, referente ao projeto de estruturas de concreto — procedimento, a ISO 15686-1:2011, referente ao planejamento da vida útil de edifícios e ativos construídos — princípios gerais e estrutura, e a ABNT NBR 15575:2013, referente ao desempenho de edificações habitacionais.

Com isto, a avaliação do Ciclo de Vida aqui proposto – de acordo com os procedimentos de entradas e saídas orientados pela NBR ISO 14040-1:2009 – atuou especificamente nos Níveis 1 (Produtos) e 2 (Elementos). Como o foco do estudo consiste na

fase de utilização, os códigos B1 a B7 foram adaptados para a realidade local de acordo com os 09 (nove) fatores apresentados anteriormente. A partir das considerações adotadas (apresentadas acima) a metodologia foi dividida em 04 (quatro) etapas: Etapa 1 – Rastreabilidade e análise de Laudos anteriores dos edifícios, definição de indicadores; Etapa 2 – Criação de Inventário do Ciclo de Vida dos Conjuntos, Análise dos Projetos Executivos dos Conjuntos Habitacionais e Sorteio das amostras (unidades e prédios) a serem avaliados em cada conjunto; Etapa 3 – Anamnese com a APO, Diagnóstico com a Inspeção predial e o checklist da mesma e prognóstico com o cálculo da vida útil pelo Método dos Fatores; Etapa 4 – Análise dos resultados e avaliação dos impactos.

Para isto, algumas características foram adotadas, tais como: i) ter, no mínimo quatro anos de uso, ii) possuir até quatro pavimentos, iii) ter tipologia “H” e/ou “E”, iv) ter planta baixa de até 40 m², v) ter todos os projetos arquivados para consulta, vi) possuir estruturas construídas em concreto ou alvenaria estrutural ou alvenaria de vedação ou estrutura mista, vii) ter sido produzido pela Prefeitura da Cidade do Recife (PCR), viii) situar-se dentro das seis Regiões Político - Administrativas (RPA’s), ix) ser destinado para população com renda de zero a 3 (três) salários mínimos, e x) e ter condições de segurança para a atuação equipe de campo.

A amostra, obtida por meio da segunda triagem, foi composta pela população final delimitada de 08 (oito) conjuntos habitacionais, ou seja, todos os conjuntos selecionados e seus respectivos blocos atenderam aos critérios de inclusão para a cidade, sendo assim, a pesquisa pode ser considerada estatisticamente representativa para a cidade do Recife-PE. Realizou-se o sorteio de forma aleatória – com ajuda da ferramenta do Excel – para a seleção dos apartamentos onde seriam realizadas as inspeções internas e aplicados os questionários aos moradores e/ou usuários. Os resultados dos instrumentos anteriores, como os da APO e da inspeção predial, serviram como parâmetros para as notas dadas aos fatores de qualidade considerados no Método dos Fatores.

A partir do cruzamento entre os indicadores e quesitos usados no questionário sugerido por Gomide, Fagundes Neto e Gullo (2014), foram feitas adaptações e definidos os critérios e indicadores finais adotados para o cálculo da Vida Útil Estimada (VUE) nesta pesquisa. Com isso, buscou-se traduzir o resultado para uma abordagem e linguagem mais prática e próxima do usuário/morador, já que os números reforçam a abordagem sistêmica e qualiquantitativa que o autor enaltece em seu livro.

Cada fator foi abordado dentro de cada condição: Condição Técnica, Condição de Manutenção e Condição de Uso. Dessa forma, totalizou-se, assim, nove (09) fatores avaliados, onde as notas aplicadas – de 0,8 a 1,2 – foram calculadas. Após isso, foi calculada a média entre as notas de cada um dos fatores para, assim, se chegar à idade e ao percentual de degradação do conjunto habitacional como um todo. Foram considerados ainda os aspectos de degradação da vida da útil não apenas por perda de aptidão do elemento e/ou produto, mas também por obsolescência. Isto é, quando o mesmo deixa de desempenhar satisfatoriamente as suas funções, não só por ter perdido as suas aptidões, mas também por ter sofrido alterações em relação ao desempenho. Por exemplo, uma janela que, apesar de ter condições fechar e abrir, ao se observar dificuldade para executar uma dessas operações, seria considerada degradada. Além da "degradação" da função, consideraram-se também as degradações decorrentes por questões tecnológicas ou econômicas (de manutenção).

A última etapa do estudo, foi possível analisar as informações de saída referentes ao ciclo de vida dos conjuntos habitacionais. Neste estudo adotou-se a Vida Útil de Projeto de 50 anos, conforme recomendava a norma ABNT NBR 6118:2014. Diante da variabilidade de comportamentos, é coerente considerar previsível a existência de variabilidades no desempenho e na duração da vida útil de soluções construtivas idênticas. Finalizado os procedimentos metodológicos, todas as coletas de dados e informações foram tratadas para o cálculo e a avaliação final.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Permitindo uma visão geral dos resultados obtidos nos conjuntos habitacionais vistoriados, a Tabela 1 mostra os valores calculados por conjunto habitacional, respectivamente.

Tabela 1 - Resumo da VUEA por conjunto habitacional avaliado

CONJUNTOS HABITACIONAIS AVALIADOS	VIDA ÚTIL DE SERVIÇO (IDADE ATUAL EM ANOS)	VIDA ÚTIL DE SERVIÇO ESTIMADA PÓS USO (IDADE CALCULADA APÓS USO EM ANOS)	VIDA ÚTIL ESTIMADA ATUAL (VUEA) EM ANOS	REDUÇÃO NA VIDA ÚTIL DE PROJETO (%)
Conjunto Habitacional CH 01 - RPA 04	**6,58**	**20,93**	**29,07**	**41,86%**
Conjunto Habitacional CH 02 - RPA 04	**7,33**	**22,87**	**27,13**	**45,74%**
Conjunto Habitacional CH 03 - RPA 05	**7,58**	**26,01**	**23,99**	**52,02%**

CONJUNTOS HABITACIONAIS AVALIADOS	VIDA ÚTIL DE SERVIÇO (IDADE ATUAL EM ANOS)	VIDA ÚTIL DE SERVIÇO ESTIMADA PÓS USO (IDADE CALCULADA APÓS USO EM ANOS)	VIDA ÚTIL ESTIMADA ATUAL (VUEA) EM ANOS	REDUÇÃO NA VIDA ÚTIL DE PROJETO (%)
Conjunto Habitacional CH 04 - RPA 02	**6,42**	**28,87**	**21,13**	**57,74%**
Conjunto Habitacional CH 05 - RPA 02	**6,42**	**31,42**	**18,58**	**62,84%**
Conjunto Habitacional CH 06 - RPA 03	**4,50**	**28,83**	**21,17**	**57,66%**
Conjunto Habitacional CH 07 - RPA 02	**5,50**	**27,12**	**22,88**	**54,24%**
Conjunto Habitacional CH 08 - RPA 02	**6,67**	**27,36**	**22,64**	**54,72%**
A Vida Útil Estimada (VUE) adotada para comparativo com a VUEA é de 50 anos. Conforme NBR 6118.				

Fonte: Autoria própria (2017).

Diante dos resultados obtidos, foi possível verificar que os conjuntos habitacionais vistoriados estão abaixo da vida útil projetada e a referenciada por norma, que é de, no mínimo, 50 anos para a estrutura de uma edificação. O CH01 foi o que mais se aproximou da idade ideal esperada, enquanto que o CH 05 foi o que mais se afastou desta expectativa de vida, de acordo com simulação realizada e sua faixa de validade para estruturas estimada pela ABNT NBR 6118:2014. Para o prognóstico do CH 05, por possuir apenas um bloco de apartamentos, o resultado se deu de forma mais rápida, proporcionando uma análise otimizada. Com a média de todos os fatores avaliados que compõem o CH 05, pode-se chegar ao resultado global de Vida Útil Estimada Atual (Vuea) de 18,58 anos como mostra o Tabela 2.

Tabela 2: Vida Útil Estimada Atual do CH 05

FATORES	B	C	A	G	G	G	D	E	F
MÉDIA P/ ITEM	0,96	0,90	0,86	0,80	0,83	0,89	0,88	0,80	0,84
MÉDIA P/ FATOR	0,96	0,90	0,86	0,84			0,88	0,80	0,84
VUEA =	18,58401 Anos		Vida Útil Estimada do Conjunto Habitacional CH 05						

Fonte: Autoria própria (2017).

Os cálculos revelaram um valor de Vuea de 18,58 anos para o CH 05. Isso significa que as relações de uso, a falta de manutenção e as manifestações patológicas adquiridas e congênitas causaram uma redução significativa da vida útil estimada deste habitacional durante estes primeiros 6 anos de uso (idade de serviço), num percentual de 62,84%.

Pode-se dizer que o CH 05 apresentou um diagnóstico ruim de degradação da sua estrutura, já que esse fator possui uma vida útil de serviço atual de 31,42 anos, quando esta deveria ser de 6 anos. Desta forma, a idade como validade do produto estrutural para se começarem os tratamentos de manutenção corretiva e/ou recuperação é de apenas 18,58 anos, quando deveria ser de 44 anos. Sendo este o conjunto habitacional mais precário avaliado devido à condição de uso.

O alto nível de violência do bairro e a hostilidade dos moradores e/ou funcionários se fizeram presentes durante o período de trabalho. Devido a essa realidade, os números ficaram da seguinte forma: de 24 unidades do habitacional (UH), 50% foram sorteadas e selecionadas; destas participaram apenas 20,8%, contra 29,2%, que não quiseram e/ou não estavam em casa. Toda a seleção para abordagem foi aleatória. Como resultados da Habitabilidade, Figura 1, obteve-se um percentual de 60 % dos moradores e/ou usuários avaliando como precário o tamanho da UH; 20% dos moradores e/ou usuários avaliaram-no como razoável; 20% consideraram-no bom; e nenhum morador e/ou usuário avaliaram-no como ótimo e/ou péssimo.

Figura 1: Habitabilidade – Satisfação, com qualificaram o tamanho do apartamento.

Fonte: Autoria própria (2017).

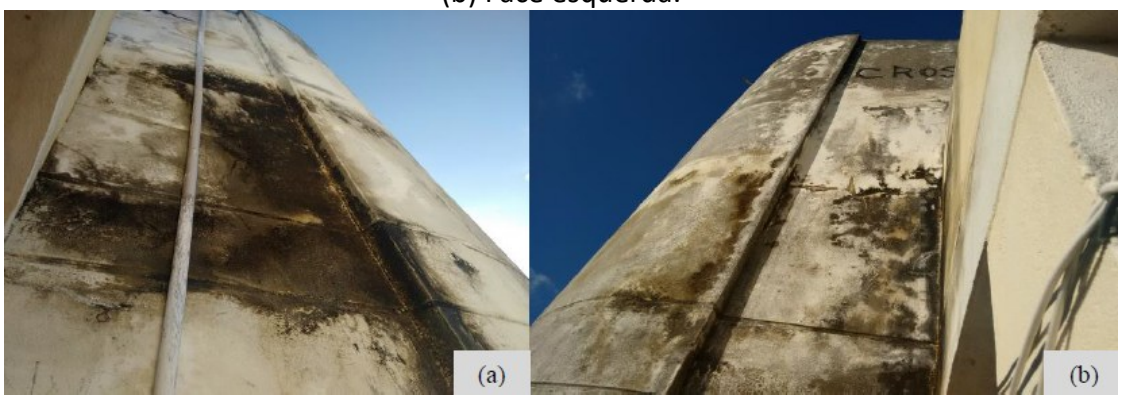
Observou-se que 100% dos moradores e/ou usuários realizaram reformas e alterações nas Unidades Habitacionais (UH) de maneira irregular e desprovida de suporte técnico. Entre os conjuntos analisados, o CH 05 destacou-se por apresentar o maior índice de intervenções internas, além de acentuados sinais de depreciação e vandalismo nas fachadas, áreas comuns e instalações — a exemplo de falhas críticas no sistema hidrossanitário, quadros de medidores danificados e problemas estruturais e de vedação.

A partir dos dados da Avaliação Pós-Ocupação (APO) — que evidenciaram a carência de manutenção e o uso inadequado das edificações —, mapeou-se o impacto direto dessas

manifestações patológicas, registradas algumas nas Figuras 2 e 3 a seguir, no ciclo de vida do CH 05:

- Presença marcante de manchas de umidade e fissuras nas fachadas;
- Vazamentos, acúmulo de lodo, proliferação de vegetação e trincas na base estrutural da caixa d'água (fundação), além de fissuras na parte superior;
- Infiltrações recorrentes nas esquadrias e janelas das fachadas;
- Degradação acentuada nos *shafts* e nos quadros de medidores;
- Pavimentação comprometida por danos estruturais e falhas de conservação;
- Presença de vegetação obstrutiva em calhas e rufos;
- Entupimentos frequentes na rede de esgoto;
- Cisternas operando sem manutenção, apresentando degradação e mau funcionamento;
- Evidências generalizadas de vandalismo em todo o conjunto habitacional.

Figura 2: Caixa de água com vazamento e degradação em ambas as faces: (a) Face direita e (b) Face esquerda.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 3: Instalação de condicionadores de ar com a perfuração de elementos estruturais (vigas e paredes) na fachada.

Fonte: Autoria própria (2017).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises evidenciaram que as condições de uso e manutenção atuam com pesos equivalentes e determinantes para o envelhecimento precoce dos Conjuntos Habitacionais avaliados. Notou-se um equilíbrio entre os fatores técnicos e comportamentais, demonstrando que a baixa habitabilidade e ambiência dessas moradias não podem ser atribuídas exclusivamente aos hábitos dos moradores. Metodologicamente, a integração da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) por meio do Método dos Fatores — associada à planilha adaptada do IBAPE-SP e aos questionários de Avaliação Pós-Ocupação (APO) — mostrou-se eficiente e eficaz. O modelo destacou-se pela viabilidade de custos, previsibilidade e utilidade como ferramenta de gestão, planejamento de manutenção e assistência técnica, permitindo prospectar a durabilidade ainda na fase de projeto e mitigar impactos urbanos e sociais.

Os cálculos revelaram que a vida útil de serviço das HIS em Recife-PE sofre forte impacto e degradação, gerando riscos e insegurança aos moradores e ao entorno. Esse cenário expõe a persistência de políticas habitacionais pautadas na repetição de padrões projetuais e financeiros obsoletos, que apenas transferem problemas de insalubridade e inadequação espacial para as famílias. Por fim, o estudo aponta que a sustentabilidade e a extensão do ciclo de vida das HIS exigem uma reformulação estrutural nos padrões arquitetônicos adotados. Além de considerar a herança cultural, o comportamento humano e o entorno urbano, é imprescindível rigor técnico na qualidade dos materiais, na execução e no desempenho. Esse salto qualitativo viabiliza obras mais duráveis e saudáveis, capazes de retardar a manutenção corretiva e otimizar os investimentos públicos no setor.

AGRADECIMENTOS

À Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI/UPE) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC/UPE), pelo suporte institucional e incentivo constante à investigação. À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pelo precioso apoio financeiro concedido desde a génese deste trabalho. Aos órgãos e gestores públicos pela colaboração indispensável durante o trabalho de campo, e aos técnicos do Departamento Social pelo acompanhamento de campo e facilitação do acesso às comunidades. Por fim, o mais sincero agradecimento às comunidades e a todas as famílias residentes nos Conjuntos Habitacionais de Interesse Social, que abriram

as suas portas e cederam os seus territórios, tornando esta pesquisa possível através da sua participação ativa.

REFERÊNCIAS

ACCIOLI, Marta Elisa Riekstin; ORNSTEIN, Sheila Walbe. **Revisão sistemática da literatura**: **a Avaliação Pós-Ocupação (APO) e os projetos de escritórios fabris**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DE PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 6., 2021, Porto Alegre.

AL MUGHAIRI, Majid; BEACH, Thomas; REZGUI, Yacine. **Post-occupancy evaluation for enhancing building performance and automation deployment.** Journal of Building Engineering, v. 77, p. 107388, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107388.

ARTAYASA, I. Nyoman. **Ergonomics and Tri Hita Karana on Balinese Traditional Houses Building. Lekesan: Interdisciplinary Journal of Asia Pacific Arts**, v. 4, n. 1, p. 7–11, 2021. DOI: https://doi.org/10.31091/lekesan.v4i1.1351.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 6118: **projeto de estruturas de concreto — procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT **NBR 6118: projeto de estruturas de concreto — procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT **NBR 15575-1: edificações habitacionais — desempenho — parte 1**: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR **ISO 14040: gestão ambiental — avaliação do ciclo de vida — princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Versão corrigida 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR **ISO 14044: gestão ambiental — avaliação do ciclo de vida — requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Versão corrigida 2014.

BARBOSA, Maylson de Alencar; PEREIRA, Lucas Melchiori; ORNSTEIN, Sheila Walbe. **Análise dos fluxos de atividades em ambientes construídos: revisão de escopo**. Simpósio Brasileiro de Qualidade de Projeto do Ambiente Construído, v. 9, n. 1, p. 1–8, 2025. DOI: https://doi.org/10.46421/sbqp.v9i.7633.

BOURKE, Kathryn P.; SILVA, Ana; GASPAR, Pedro L. **Application of Service Life Planning to Existing Buildings – Perspectives on Condition Appraisal, Performance and Cost**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 16., 2023, China. Proceedings [...]. China: CIMNE, 2023. p. 1–8. DOI: https://doi.org/10.23967/c.dbmc.2023.070.

CARVALHO FILHO, A. C. **Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento: aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento**. 2001. Tese

(Doutorado em Engenharia Civil) – Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2001.

COUTO, A. C. **Integração da análise do ciclo de vida nas práticas de projeto de edifícios: aplicação a um caso prático**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2014.

GLASS, Jacqueline et al. Future use of life-cycle assessment in civil engineering. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, v. 166, n. 4, p. 204–212, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1680/coma.12.00037. Acesso em: 21 set. 2026.

GOMIDE, Tito; FAGUNDES NETO, Jerônimo Cabral Pereira; GULLO, Marco Antonio. **Inspeção predial total: diretrizes e laudos no enfoque da qualidade total e da engenharia diagnóstica**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS DE ENGENHARIA DE SÃO PAULO (IBAPE/SP). **Inspeção predial: check-up predial: guia da boa manutenção**. São Paulo: IBAPE/SP, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 15686-1: Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 1: General principles and framework**. Geneva: ISO, 2000.

LESSA, A. K. M. da C.; SOUZA, H. L. **Gestão da manutenção predial**: uma aplicação prática. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2010.

LIU, P.; ZHANG, Q.; ZHONG, K.; WEI, Y.; WANG, Q**. Climate adaptation and indoor comfort improvement strategies for buildings in high-cold regions: empirical study from Ganzi Region, China.** Sustainability, v. 14, n. 1, p. 576, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/su14010576.

MATOS, M. J. S. **Durabilidade como critério de projeto: o método fatorial no contexto português**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.

OLIVEIRA, R. A.; PIRES SOBRINHO, C. W. A.; AZEVEDO, A. A. C. **Edificações em alvenaria resistente na Região Metropolitana do Recife.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 175–199, 2017.

ORNSTEIN, Sheila Walbe. **Avaliação pós-ocupação do ambiente construído**. São Paulo: Studio Nobel: Edusp, 1992.

PIRES SOBRINHO, C. W. et al. **Caracterização do grau de risco ao desabamento para edificações em alvenaria resistente na Região Metropolitana do Recife**. Recife: IBRACON, 2009.

PORTO, Cássia Gisele Dias. **Avaliação do ciclo de vida ambiental e social na construção de habitações populares em Santa Cruz do Capibaribe - PE**. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Caruaru, 2025.

PREFEITURA DO RECIFE. Lei n.º 17.511, de 29 de dezembro de 2008. **Promove a revisão do Plano Diretor do Município do Recife. Recife, 2008**. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/plano-diretor-recife-pe. Acesso em: 15 fev. 2016.

PREFEITURA DO RECIFE. Lei Complementar n.º 2, de 23 de abril de 2021. **Institui a revisão do Plano Diretor da Cidade do Recife. Recife, 2021**. Disponível em: https://licenciamentounificado.recife.pe.gov.br/sites/default/files/2022-05/PDCR%20-%20LeiComplementar%20n%C2%BA%2002.2021_DO%20Recife%20058%20Edi%C3%A7%C3%A3o%2024-04-2021-p%C3%A1ginas-4-1008%20%281%29.pdf. Acesso em: 13 jun. 2026.

REZAEI, Farzaneh; BULLE, Cécile; LESAGE, Pascal. **Integrating building information modeling and life cycle assessment in the early and detailed building design stages.** Building and Environment, v. 153, p. 158–167, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.034.

RODRIGUES, Priscila Raffi. **Avaliação do ciclo de vida na fase de uso dos conjuntos habitacionais de interesse social na cidade do Recife/PE: sua vida útil estimada. 2017**. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2017.

Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?id_trabalho=5016559. Acesso em: 10 jul. 2026.

ROLNIK, R. **Cidade e a lei**. São Paulo: Nobel, 1981.

SANTOS, M. C. A. **Avaliação do ciclo de vida com foco em habitações de interesse social.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2012.

SCHERZ, Marco; WIESER, Antonija Ana; PASSER, Alexander; KREINER, Helmuth. **Implementation of life cycle assessment (LCA) in the procurement process of buildings: a systematic literature review**. Sustainability, v. 14, n. 24, 16967, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/su142416967.

SILVA, N. C. M. S. **Análise da vida útil estimada das edificações baseada na Norma de Desempenho ABNT NBR 15575:2013. 2016.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2016.

TRAJANO, L. **Avaliação do ciclo de vida dos produtos derivados do cimento para habitações de interesse social. 2010**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2010.

UN-HABITAT. UN-Habitat **Assembly: achieving universal access to adequate housing through inclusive and stronger multilateralism.** Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2023.

ZARZAR JÚNIOR, F. C. **Metodologia para estimar a vida útil de elementos construtivos baseada no método dos fatores. 2007.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2007.

CAPÍTULO VIII

ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO ECONÔMICA COM RESÍDUOS DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS UTILIZANDO TECNOLOGIA DE POLÍMEROS

COST-EFFECTIVE MAINTENANCE STRATEGY FOR UNPAVED ROADS USING POLYMER TECHNOLOGY

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-8

Kleverson Kennedy Eleutério Rocha [1]
Victor Lucas de Macedo Alves [2]
Eliana Cristina Barreto Monteiro [3]
Ângelo Just da Costa e Silva [4]

[1] Mestrando do Programa de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco- UNICAP. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-1980-8487
[2] Mestrando do Programa de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco- UNICAP. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4477-529X
[3] Escola de Tecnologia e Comunicação. Universidade Católica de Pernambuco–UNICAP. Universidade de Pernambuco- UPE. 52050-900 Recife, PE . ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0842-779X
[4] Escola de Tecnologia e Comunicação. Universidade Católica de Pernambuco–UNICAP. Universidade de Pernambuco- UPE. 52050-900 Recife, PE . ORCID: *https://orcid.org/0000-0002-0759-6439*

RESUMO

Este trabalho aborda uma estratégia de manutenção econômica de estradas não pavimentadas baseada na utilização de resíduos provenientes dessas vias associados à tecnologia de polímeros através do estado da arte. A proposta fundamenta-se no aproveitamento e na estabilização dos materiais disponíveis nas próprias estradas, buscando reduzir a necessidade de transporte e aquisição de novos materiais e, consequentemente, os custos relacionados às atividades de manutenção. Nesse contexto, os polímeros apresentam potencial para modificar as características dos materiais empregados, contribuindo para o aprimoramento de propriedades relacionadas à resistência, coesão, estabilidade e comportamento frente à ação da água e às solicitações do tráfego. A aplicação dessa tecnologia também pode favorecer o aproveitamento de resíduos gerados durante operações de manutenção, promovendo uma abordagem alinhada aos princípios de sustentabilidade e economia circular. A caracterização dos materiais e a avaliação de seu desempenho são fundamentais para estabelecer condições adequadas de aplicação e verificar a eficiência da estabilização promovida pelos polímeros. Espera-se que a estratégia proposta busque integre redução de custos, reaproveitamento de resíduos e melhoria do desempenho das estradas não pavimentadas, constituindo uma alternativa potencialmente mais sustentável para atividades de conservação da infraestrutura viária.

Palavras-chave: Estabilização de solos; conservação viária; pavimentação; reaproveitamento de materiais; sustentabilidade; desempenho mecânico; infraestrutura rodoviária; estradas rurais.

ABSTRACT

This study addresses an economical maintenance strategy for unpaved roads based on the use of materials generated from these roads combined with polymer technology. The proposed approach is based on the reuse and stabilization of materials available within the road itself, aiming to reduce the need for transportation and acquisition of new materials and, consequently, lower maintenance costs. In this context, polymers have the potential to modify the characteristics of the materials used,

contributing to improvements in properties related to strength, cohesion, stability, and resistance to water action and traffic loads. The application of this technology may also promote the reuse of materials generated during maintenance operations, supporting an approach aligned with sustainability and circular economy principles. Material characterization and performance evaluation are essential for establishing appropriate application conditions and assessing the effectiveness of polymer-induced stabilization. The proposed strategy seeks to integrate cost reduction, material reuse, and improved performance of unpaved roads, representing a potentially more sustainable alternative for road infrastructure maintenance.

Keywords: Soil stabilization; road maintenance; pavement engineering; material reuse; sustainability; mechanical performance; road infrastructure; rural roads.

1. INTRODUÇÃO

As estradas não pavimentadas desempenham importante função na mobilidade e no desenvolvimento socioeconômico, especialmente em áreas rurais e regiões onde a implantação de pavimentos convencionais apresenta limitações técnicas ou econômicas. Apesar do menor custo inicial de implantação, essas vias demandam intervenções frequentes de conservação devido à ação do tráfego, da água e das condições climáticas. Problemas como formação de panelas, corrugações, trilhas de roda, erosão, perda de material superficial e geração de poeira comprometem progressivamente as condições de trafegabilidade e aumentam os custos de manutenção. O DNIT estabelece procedimentos específicos para avaliação e conservação dessas vias, considerando aspectos relacionados às condições da superfície e da drenagem.

A manutenção convencional de estradas não pavimentadas normalmente envolve operações de patrolamento, recomposição da camada superficial e incorporação ou substituição de materiais. Entretanto, a necessidade constante de aquisição, transporte e aplicação de novos agregados pode elevar significativamente os custos de conservação. Nesse contexto, o reaproveitamento dos materiais já existentes na própria estrada surge como alternativa capaz de reduzir o consumo de recursos naturais, a movimentação de materiais e os custos associados às intervenções. Estudos realizados em estradas não pavimentadas demonstram que a utilização de materiais locais e técnicas de estabilização pode proporcionar melhorias de desempenho e, simultaneamente, apresentar vantagens ambientais e econômicas (Albuquerque filho et al., 2024).

O comportamento das estradas não pavimentadas está diretamente relacionado às características físicas, mecânicas e hidráulicas dos materiais empregados. Propriedades como granulometria, plasticidade, compactação, capacidade de suporte, resistência e sensibilidade

à água influenciam diretamente a estabilidade da camada de rolamento. Dessa forma, quando o material disponível apresenta características inadequadas, técnicas de estabilização podem ser utilizadas para melhorar seu desempenho. Entre essas alternativas encontram-se a estabilização mecânica, química e a utilização de materiais poliméricos e biopoliméricos.

A aplicação de polímeros na estabilização de materiais geotécnicos tem recebido crescente atenção devido à capacidade desses produtos de promover alterações na interação entre as partículas do solo. Segundo Huang et al. (2021), os polímeros podem atuar por meio da formação de películas e ligações entre partículas, aumentando a coesão e modificando propriedades relacionadas à resistência, permeabilidade, estabilidade e durabilidade do material estabilizado. Entretanto, o desempenho da técnica depende de fatores como tipo de solo, características do polímero, concentração utilizada, condições de umidade e processo de aplicação.

Estudos experimentais também demonstram resultados promissores para a aplicação de polímeros em materiais destinados à infraestrutura rodoviária. Marinho Filho e Macedo (2025) observaram melhorias em parâmetros como resistência à compressão simples, resistência à tração indireta, índice de suporte Califórnia e módulo resiliente em solos modificados com polímeros. Resultados relacionados à utilização de poliacrilamida também indicam potencial para aumentar a resistência ao desgaste, reduzir a erosão e melhorar o comportamento de materiais empregados em estradas de baixo volume de tráfego.

Além do aumento da resistência, a utilização de polímeros pode contribuir para o controle da geração de poeira, um dos problemas recorrentes em estradas não pavimentadas. A aplicação desses produtos pode favorecer a agregação das partículas finas, diminuindo sua dispersão provocada pelo tráfego e pelo vento. Dessa maneira, a estabilização polimérica pode atuar simultaneamente sobre diferentes mecanismos de deterioração da via, contribuindo para a redução da frequência de intervenções.

Outro aspecto relevante é a possibilidade de associar a tecnologia de polímeros ao reaproveitamento de resíduos. Materiais provenientes das próprias operações de manutenção, resíduos de construção e demolição, materiais reciclados e resíduos plásticos vêm sendo investigados para aplicações em infraestrutura rodoviária. Essa abordagem está relacionada aos princípios da economia circular, uma vez que busca transformar materiais que poderiam ser descartados em insumos para novas aplicações. Estudos recentes demonstram,

por exemplo, o potencial de resíduos plásticos e geossintéticos reciclados na melhoria do comportamento estrutural de estradas não pavimentadas.

A relação entre desempenho técnico, custo e sustentabilidade torna-se, portanto, fundamental para a definição de estratégias de manutenção. A redução da necessidade de transporte e aquisição de materiais externos pode representar uma vantagem econômica importante, principalmente em locais distantes de jazidas ou centros fornecedores. Além disso, o aumento da durabilidade da camada estabilizada pode reduzir a frequência das intervenções e, consequentemente, os custos acumulados ao longo do período de utilização da via. Assim, análises de custo do ciclo de vida constituem importante ferramenta para comparar a manutenção convencional com alternativas baseadas em estabilização.

O artigo de Silva et al. (2002), utilizado como referência inicial deste estudo, demonstra que as características estruturais e térmicas dos polímeros exercem influência significativa sobre o comportamento dos materiais modificados. Embora o trabalho esteja direcionado à modificação de ligantes asfálticos, seus resultados fornecem uma importante base conceitual para compreender que diferentes polímeros apresentam comportamentos distintos e que a seleção do material modificador deve considerar suas características e a finalidade da aplicação.

Diante desse contexto, a utilização de resíduos ou materiais disponíveis nas próprias estradas não pavimentadas, associada à tecnologia de polímeros, apresenta-se como uma alternativa potencial para o desenvolvimento de estratégias de manutenção mais econômicas e sustentáveis. A proposta permite integrar o reaproveitamento de materiais, a estabilização do solo, a redução da necessidade de novos agregados e a melhoria do desempenho da via, buscando diminuir os custos e a frequência das intervenções.

Assim, este trabalho tem como objetivo analisar uma estratégia de manutenção econômica para estradas não pavimentadas baseada no reaproveitamento de resíduos e materiais existentes na via associados à tecnologia de polímeros, considerando aspectos de desempenho mecânico, resistência à ação da água, durabilidade, redução de custos e sustentabilidade. A abordagem proposta busca contribuir para o desenvolvimento de soluções de conservação tecnicamente eficientes e ambientalmente adequadas, especialmente para vias de baixo volume de tráfego e regiões onde a disponibilidade de materiais convencionais é limitada.

2. QUAL A VANTAGEM DO ASFALTOS POLIMÉRICOS

Na figura 1 mostra que o emprego de polímeros na modificação de materiais asfálticos constitui uma estratégia para melhorar propriedades que influenciam diretamente o desempenho e a durabilidade dos pavimentos. A incorporação do polímero modifica o comportamento reológico do ligante, podendo aumentar sua elasticidade, coesão, resistência à deformação permanente e capacidade de recuperação após a aplicação de cargas repetidas. Silva et al. (2002) verificaram diferenças significativas entre os polímeros empregados, avaliando viscosidade, retorno elástico, comportamento reológico e estabilidade à estocagem. Entre os materiais estudados, os polímeros do tipo SBS apresentaram o melhor desempenho como modificadores do asfalto.

Figura 1 – Vantagens do asfalto polímero em estradas não pavimentadas

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2002); Huang et al (2021); Jiménez et al (2021); United States Federal Highway Administration (s. d.)

Uma das principais vantagens está relacionada à **resistência à deformação permanente**, especialmente em condições de temperatura elevada e tráfego intenso. A literatura demonstra que a formação de uma rede polimérica dentro do ligante pode aumentar sua rigidez e elasticidade, reduzindo a ocorrência de afundamentos de trilha de roda e outros mecanismos de deterioração. Revisões recentes indicam que o SBS, por exemplo, apresenta elevada eficiência na melhoria da resistência ao rutting, recuperação elástica e comportamento à fadiga.

Outro benefício está relacionado à **durabilidade**. A modificação pode melhorar a resistência do material ao envelhecimento, à ação da temperatura e aos ciclos de carregamento. Entretanto, os benefícios dependem do tipo e da concentração do polímero, da composição do ligante e das condições de mistura e armazenamento. Portanto, não se pode considerar que qualquer polímero produzirá automaticamente o mesmo desempenho.

No contexto das estradas não pavimentadas, a tecnologia de polímeros pode ser associada à estabilização do material existente, contribuindo para aumentar a coesão entre partículas, diminuir a erosão superficial e controlar a geração de poeira. Estudos sobre estabilização polimérica de solos demonstram potencial para melhoria das propriedades mecânicas e da durabilidade dos materiais empregados em infraestrutura rodoviária.

Assim, a principal vantagem para a proposta deste trabalho está na possibilidade de **reduzir a frequência das intervenções de manutenção**, aproveitando materiais já existentes na estrada e utilizando o polímero como agente estabilizante. Essa estratégia pode reduzir a necessidade de transporte e aquisição de novos materiais, aproximando a manutenção de uma abordagem de economia circular.

3. MATERIAL E METODOLOGIA

A metodologia proposta deve considerar que a estratégia estudada combina três elementos principais: material existente na estrada, resíduo potencialmente reutilizável e polímero estabilizante.

Inicialmente, é recomendado realizar a caracterização do material proveniente da estrada não pavimentada como ilustrado na figura 2. Devem ser determinados parâmetros como granulometria, limites de Atterberg, umidade, massa específica, compactação e capacidade de suporte. O objetivo é verificar a condição inicial do material e estabelecer uma referência para comparação com as misturas estabilizadas.

Posteriormente, o material pode ser submetido à incorporação do polímero em diferentes concentrações. Recomenda-se a utilização de pelo menos três níveis de dosagem, além de uma amostra de referência sem tratamento. Dessa forma, torna-se possível identificar uma concentração que apresente equilíbrio entre desempenho técnico e custo.

A etapa experimental deve contemplar a preparação dos corpos de prova, compactação e cura sob condições controladas. Em seguida, devem ser realizados ensaios mecânicos e de durabilidade, possibilitando a comparação entre o material convencional e o material estabilizado.

Entre os parâmetros mais importantes estão CBR, resistência à compressão, resistência à tração indireta, módulo resiliente, perda de massa, resistência à ação da água e comportamento diante de ciclos de umedecimento e secagem. A escolha definitiva dos ensaios deve ser compatibilizada com o tipo de polímero e com o material utilizado.

Figura 2 – Estabilização de material de estrada não pavimentada com polímeros

Fonte: Autoria própria.

A literatura mostra que a estabilização polimérica pode produzir ganhos significativos, mas também evidencia que o comportamento depende das características do solo e do polímero. Huang et al. (2021), por exemplo, destacam que diferentes polímeros apresentam mecanismos distintos de estabilização e efeitos sobre resistência, permeabilidade, expansão e durabilidade.

Dessa maneira, a metodologia deve permitir comparar quatro aspectos:

1. desempenho mecânico;
2. durabilidade;
3. custo de manutenção;
4. potencial de reaproveitamento de resíduos.

4. TIPO DE POLÍMEROS

Os polímeros empregados em materiais rodoviários podem apresentar diferentes características químicas e mecanismos de atuação de acordo com a tabela 1 a seguir. De maneira geral, podem ser divididos em polímeros sintéticos, polímeros naturais/biopolímeros e polímeros provenientes de resíduos reciclados;

Entre os polímeros sintéticos utilizados na modificação de ligantes asfálticos destacam-se o SBS (estireno-butadieno-estireno), SEBS (estireno-etileno-butileno-estireno), SBR, EVA e polietileno. Silva et al. (2002) estudaram especificamente SBS, SEBS e polietileno modificado, encontrando melhor desempenho para os polímeros SBS entre os materiais avaliados.

O SBS é um elastômero termoplástico amplamente empregado porque pode formar uma rede polimérica dentro do ligante, aumentando sua elasticidade e resistência à deformação. Revisões recentes também apontam o SBS como um dos modificadores mais eficientes para melhorar resistência ao afundamento, recuperação elástica e fadiga.

O SEBS apresenta comportamento semelhante ao SBS, porém possui estrutura modificada pela hidrogenação do bloco intermediário. Estudos indicam potencial para melhoria da resistência ao afundamento, embora problemas de compatibilidade e estabilidade possam ocorrer dependendo da composição do ligante.

Tabela 1 – Tipos de polímeros e principais características para aplicação em estradas não pavimentadas

Grupo de polímeros	Tipo / Exemplos	Características principais	Principais aplicações	Benefícios para a estrada não pavimentada
Polímeros sintéticos **Produzidos a partir de processos petroquímicos, com alta estabilidade e desempenho mecânico.**	SBS (estireno-butadieno-estireno)	• Alta elasticidade • Boa resistência térmica • Forma rede polimérica	Modificação de ligantes asfálticos e estabilização de solos.	Aumenta a coesão, reduz a erosão, melhora a resistência ao tráfego e à água.
	SEBS (estireno-etileno-butileno-estireno)	• Boa compatibilidade • Estabilidade química • Maior resistência ao envelhecimento	Modificação de ligantes asfálticos e misturas asfálticas.	Melhora a estabilidade e a durabilidade do material.
	SBR (estireno-butadieno)	• Boa resistência mecânica • Custo mais acessível • Versátil em diferentes aplicações	Estabilização de solos e misturas granulares.	Eleva a capacidade de suporte e reduz a formação de poeira.
	EVA (etileno-	• Flexibilidade e tenacidade • Boa adesão a	Estabilização de solos e	Melhora a trabalhabilidade

Grupo de polímeros	Tipo / Exemplos	Características principais	Principais aplicações	Benefícios para a estrada não pavimentada
	acetato de vinila)	partículas minerais • Resistência à abrasão	controle de poeira.	e a resistência ao desgaste.
	PE (polietileno)	• Alta resistência química • Baixo custo • Boa durabilidade	Misturas solo-resíduo e geossintéticos.	Contribui para a estabilização e reduz a necessidade de novos agregados.
Polímeros naturais / Biopolímeros **Obtidos de fontes renováveis, com menor impacto ambiental e boa capacidade de interação com o solo.**	Goma xantana	• Alta capacidade de retenção de água • Formação de gel • Boa interação com partículas do solo	Estabilização de solos argilosos e arenosos.	Aumenta a resistência, melhora a durabilidade e reduz a erosão.
	Lignina	• Estabilidade química • Propriedades aglutinantes • Origem renovável	Misturas solo-resíduo e controle de poeira.	Melhora a coesão, reduz a poeira e aumenta a estabilidade.
	Outros biopolímeros (celulose, amido, etc.)	• Biodegradabilidade controlada • Melhoria da coesão do solo • Baixo impacto ambiental	Estabilização de solos e matrizes de pavimentação sustentável.	Contribui para a sustentabilidade e reduz a necessidade de materiais convencionais.
Polímeros reciclados **Provenientes de resíduos plásticos e outros materiais, com potencial para reaproveitamento na infraestrutura viária.** **Grupo de polímeros**	Plástico reciclado (PET, PE, PP, etc.)	• Redução de resíduos no ambiente • Boa resistência química • Alta durabilidade	Misturas solo-plástico e estabilização de camadas superficiais.	Aumenta a resistência, reduz a erodibilidade e promove a economia circular.
	Borracha de pneus	• Elasticidade e flexibilidade • Resistência ao desgaste • Boa dissipação de tensões	Misturas asfálticas e estabilização de solos.	Melhora a resiliência, reduz a formação de poeira e aumenta a vida útil da via.

Grupo de polímeros	Tipo / Exemplos	Características principais	Principais aplicações	Benefícios para a estrada não pavimentada
	Geossintéticos reciclados (geogrelhas e geotêxteis)	• Alta resistência mecânica • Estabilidade dimensional • Facilidade de aplicação	Reforço de subleitos e camadas de base em estradas não pavimentadas.	Melhora a capacidade de suporte, reduz a deformação e aumenta a durabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Huang et al. (2021); Jiménez et al. (2021); Lee et al. (2019); Marinho Filho e Macedo (2025) e Silva et al. (2002).

Já os biopolímeros, como goma xantana, apresentam interesse crescente devido à possibilidade de utilização de materiais de origem renovável. Lee et al. (2019) demonstraram que a goma xantana pode atuar como agente estabilizante, aumentando a resistência e a ductilidade do solo utilizado em aplicações rodoviárias.

Por sua vez, polímeros provenientes de resíduos plásticos apresentam uma vantagem adicional: além de contribuir para a estabilização, possibilitam a valorização de resíduos que poderiam ser destinados a aterros ou permanecer no ambiente.

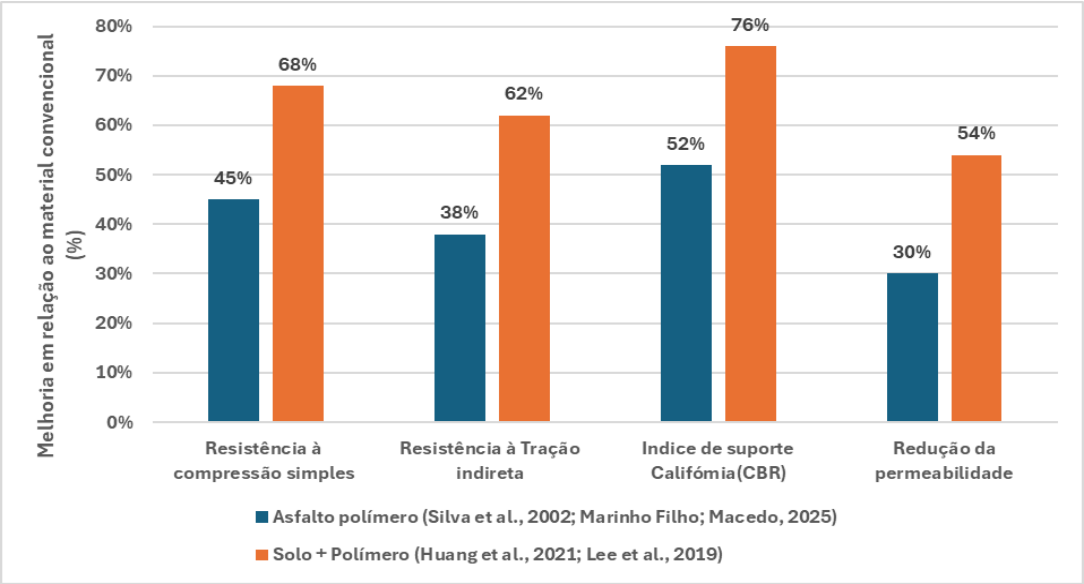
Portanto, a escolha do polímero deve considerar não apenas o ganho de resistência, mas também custo, disponibilidade, compatibilidade, durabilidade, facilidade de aplicação e impacto ambiental.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados esperados devem ser analisados comparando o material convencional com as diferentes formulações contendo polímeros.

A tendência ilustrada da figura 3, observada na literatura, é de melhoria das propriedades mecânicas após a estabilização, embora a magnitude do ganho dependa do material e da concentração utilizada. Estudos de estabilização de solos com polímeros indicam melhorias em parâmetros como resistência, capacidade de suporte e comportamento diante da ação da água.

Figura 3 – Comparativo de propriedades de misturas convencionais e com polímeros



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2002); Marinho Filho e Macedo (2025); Huang et al (2021); Lee et al. (2019).

Marinho Filho e Macedo (2025), por exemplo, estudaram solos modificados com polímeros para utilização em pavimentos rodoviários e observaram melhorias em propriedades como **CBR, resistência à compressão simples, resistência à tração indireta e módulo resiliente**.

Além da resistência, a avaliação deve considerar a durabilidade. Uma mistura que apresenta elevada resistência inicial, mas perca desempenho após ciclos de umedecimento e secagem, pode não ser adequada para utilização em estradas não pavimentadas.

Nesse sentido, o desempenho deve ser analisado de maneira integrada:

resistência + durabilidade + comportamento hidráulico + custo + sustentabilidade.

6. APLICABILIDADE DESSA TECNOLOGIA

A aplicação da tecnologia proposta é especialmente interessante para **estradas vicinais, rurais e vias de baixo e médio volume de tráfego**, nas quais os custos associados ao transporte de agregados e às operações repetitivas de manutenção podem representar parcela significativa dos custos de conservação.

A utilização do próprio material existente na estrada permite reduzir a necessidade de remoção e substituição completa da camada superficial. O polímero pode atuar como agente

estabilizante, enquanto resíduos selecionados podem funcionar como componentes adicionais da mistura.

Essa abordagem é particularmente relevante em regiões onde existe disponibilidade limitada de materiais granulares de boa qualidade. Estudos realizados em estradas não pavimentadas demonstram que soluções de estabilização podem apresentar benefícios tanto do ponto de vista mecânico quanto ambiental.

A aplicabilidade, entretanto, deve ser condicionada à caracterização prévia do material. Solos com diferentes granulometrias, plasticidades e condições de umidade podem responder de maneira distinta ao mesmo polímero.

Outro aspecto importante é a **manutenção preventiva**. Em vez de utilizar o polímero somente depois que a estrada apresentar deterioração significativa, sua aplicação pode ser planejada como estratégia de conservação, buscando aumentar a vida útil do material e reduzir a frequência das intervenções.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de polímeros em materiais rodoviários apresenta potencial para melhorar o desempenho mecânico, a durabilidade e a resistência à ação das condições ambientais. Os estudos analisados indicam que o comportamento obtido depende diretamente do tipo de polímero, da concentração utilizada, das características do material de base e das condições de aplicação.

No caso dos ligantes asfálticos, Silva et al. (2002) demonstraram que os polímeros SBS apresentaram desempenho superior aos demais modificadores avaliados, evidenciando a importância da compatibilidade entre polímero e material de base.

Para estradas não pavimentadas, a associação entre reaproveitamento do material existente, resíduos e estabilização polimérica apresenta uma possibilidade de manutenção mais racional. Entretanto, a escolha da solução não deve considerar somente o aumento da resistência inicial. É necessário avaliar durabilidade, comportamento perante a água, facilidade de execução, disponibilidade dos materiais e custo durante o ciclo de vida.

Dessa forma, a estratégia proposta pode contribuir para uma manutenção mais econômica e sustentável, especialmente em vias nas quais a utilização de materiais locais e a redução da frequência das intervenções sejam fatores determinantes.

AGRADECIMENTOS

Os autores Kleverson Kennedy e Victor Lucas agradecem à CAPES pela oportunidade concedida e pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa e a Universidade Católica de Pernambuco pelo investimento de pesquisa e todo suporte prestado.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE FILHO, Francisco de Assis de et al. Mechanical performance and life cycle assessment of soil stabilization solutions for unpaved roads from Northeast Brazil. *Sustainability*, Basel, v. 16, n. 22, 9850, 2024. Disponível em: Acesso ao artigo. Acesso em: 8 set. 2026.

FONDJO, Eric; THERON, Thabiso. The use of polymers, nano-polymers, and nano-modified emulsion for gravel road maintenance: a review. IntechOpen, 2026. Disponível em: Acesso ao capítulo. Acesso em: 8 set. 2026.

HUANG, Jing et al. A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, Amsterdam, v. 305, 124685, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124685. Disponível em: Versão disponível em repositório. Acesso em: 8 set. 2026.

JIMÉNEZ, José R. et al. Review of current and future bio-based stabilisation products (enzymatic and polymeric) for road construction materials. *Transportation Geotechnics*, Amsterdam, v. 27, 100458, 2021. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100458. Disponível em: Acesso ao artigo. Acesso em: 8 set. 2026.

JONES, D.; PAIGE-GREEN, P. Limitations of using conventional unpaved road specifications for understanding unpaved road performance. *Transportation Research Record*, Washington, DC, n. 2474, 2015. Disponível em: Acesso ao artigo. Acesso em: 8 set. 2026.

LEE, S. et al. Xanthan gum biopolymer as soil-stabilization binder for road construction using local soil in Sri Lanka. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Reston, v. 31, n. 11, 06019012, 2019. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002909. Disponível em: Acesso ao artigo. Acesso em: 8 set. 2026.

MARINHO FILHO, Geraldo Moreira; MACEDO, José Alexandre de. Estudo de solos modificados com adição de polímeros para uso em pavimentos rodoviários. *Transportes*, Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: Acesso ao artigo. Acesso em: 8 set. 2026.

SILVA, Letícia Socal da; FORTE, Maria Madalena de Camargo; SPECHT, Luciano Pivoto; CERATTI, Jorge Augusto. Polímeros como modificadores asfálticos. *Transportes*, Rio de

Janeiro, v. 10, n. 1, p. 84–106, 2002. DOI: 10.14295/transportes.v10i1.164. Disponível em: Artigo original – ANPET. Acesso em: 8 set. 2026.

UNITED STATES. Federal Highway Administration. *Unpaved roads dust control and stabilization*. Washington, DC: Federal Highway Administration, [s. d.]. Disponível em: FHWA – Unpaved Roads Dust Control and Stabilization. Acesso em: 8 set. 2026.

CAPÍTULO IX

CARONAS PAGAS:REVISITANDO REFLEXÕES EXPLORATÓRIAS SOBRE MOBILIDADE COMPARTILHADA, MEDIAÇÃO ALGORÍTMICA E INTERAÇÕES SOCIAIS NA ROTA PELOTAS–PORTO ALEGRE

PAID RIDESHARING: REVISITING EXPLORATORY REFLECTIONS ON SHARED MOBILITY, ALGORITHMIC MEDIATION AND SOCIAL INTERACTIONS ON THE PELOTAS–PORTO ALEGRE ROUTE

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-9

Mara Beatriz Nunes Gomes [1]

[1] Doutora em Sociologia. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, Rio Grande do Sul (RS), Brasil.

RESUMO

Este capítulo revisita uma pesquisa exploratória de inspiração etnográfica realizada entre 2018 e 2019 sobre as interações sociais produzidas pela plataforma digital BlaBlaCar na rota rodoviária Pelotas x Porto Alegre, no sul do Brasil. Partindo de registros de observação participante produzidos durante viagens compartilhadas, busca-se atualizar a análise para o contexto de 2026, marcado pela consolidação das plataformas digitais de mobilidade, pela ampliação da mediação algorítmica nas relações cotidianas e pela crescente plataformização dos deslocamentos intermunicipais. O estudo articula os dados empíricos produzidos na pesquisa original com contribuições contemporâneas da sociologia das plataformas, do debate sobre capitalismo de plataforma e das discussões acerca da produção de confiança em ambientes digitais. Os resultados indicam que as caronas pagas ultrapassam a dimensão econômica do compartilhamento de custos, constituindo espaços temporários de sociabilidade entre desconhecidos, nos quais sistemas de reputação, avaliações e mecanismos algorítmicos desempenham papel central na construção da confiança e na coordenação das interações. Observa-se, ainda, que a rota analisada passou a assumir novas funções econômicas, incluindo situações em que motoristas utilizam deslocamentos recorrentes como estratégia complementar de geração de renda. Conclui-se que plataformas digitais como o BlaBlaCar constituem importantes infraestruturas sociotécnicas para compreender as transformações contemporâneas nas relações entre tecnologia, mobilidade e sociabilidade.

Palavras-chave: Plataformas digitais. Mobilidade compartilhada. Mediação algorítmica. Sociabilidades digitais. BlaBlaCar.

ABSTRACT

This chapter revisits an exploratory ethnographically inspired study conducted between 2018 and 2019 on the social interactions mediated by the BlaBlaCar digital platform along the Pelotas–Porto Alegre route in southern Brazil. Based on participant observation records produced during shared rides, the analysis is updated to the context of 2026, characterized by the consolidation of digital mobility platforms, the expansion of algorithmic mediation in everyday life, and the growing platformization of intercity travel. The study combines empirical data from the original research with contemporary contributions from platform studies, platform capitalism scholarship, and debates on trust-building in digital environments. The findings suggest that paid ridesharing goes beyond the economic dimension of cost-sharing, creating temporary spaces of sociability among strangers in which reputation systems, user ratings, and algorithmic mechanisms play a central role in fostering trust and coordinating interactions. Furthermore, the route under analysis has acquired new economic functions, including situations in which drivers use

recurring trips as a complementary source of income. The chapter concludes that digital platforms such as BlaBlaCar represent important sociotechnical infrastructures for understanding contemporary transformations in the relationships among technology, mobility, and sociability.

Keywords: Education. Health. Environment.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, o avanço das tecnologias digitais transformou profundamente as formas de circulação de pessoas, mercadorias, informações e serviços. A expansão das plataformas digitais redefiniu práticas cotidianas relacionadas ao trabalho, ao consumo, à comunicação e à mobilidade, produzindo novos arranjos sociotécnicos que articulam infraestrutura tecnológica, sistemas de reputação, mecanismos algorítmicos e formas inéditas de interação social. Nesse contexto, a mobilidade compartilhada emerge como um campo privilegiado para compreender as transformações contemporâneas nas relações entre tecnologia e sociedade.

Essas transformações podem ser compreendidas no contexto da consolidação da sociedade em rede, conceito desenvolvido por Castells (2021) para descrever a crescente centralidade das tecnologias da informação na organização das relações econômicas, políticas e sociais. Segundo o autor, a expansão das redes digitais não representa apenas uma inovação técnica, mas uma mudança estrutural na forma como indivíduos, instituições e mercados se articulam. Nesse cenário, plataformas digitais de mobilidade constituem expressões concretas da incorporação das lógicas em rede às práticas cotidianas de deslocamento e interação social.

Aplicativos como Uber, 99, inDrive e BlaBlaCar tornaram-se exemplos paradigmáticos desse processo ao criarem ambientes digitais capazes de conectar indivíduos desconhecidos em torno de interesses comuns, utilizando sistemas automatizados de recomendação, avaliação e reputação. Tais plataformas não apenas facilitam deslocamentos, mas também reorganizam relações de confiança, redefinem práticas econômicas e produzem novas modalidades de sociabilidade mediadas por tecnologias digitais (Van Duck; Poell; De Wall, 2018).

A literatura recente tem destacado que as plataformas digitais não devem ser compreendidas apenas como ferramentas tecnológicas neutras. Ao contrário, constituem infraestruturas sociotécnicas que organizam fluxos de informação, modulam comportamentos e influenciam a forma como indivíduos interagem em diferentes esferas da vida social (Srnicek, 2018; Zuboff, 2020). Nesse sentido, compreender os efeitos sociais da

plataformização tornou-se um desafio central para as ciências sociais contemporâneas, especialmente diante da crescente incorporação de mecanismos algorítmicos na mediação das relações cotidianas.

Entre as diversas plataformas que atuam no campo da mobilidade, o BlaBlaCar apresenta características particularmente interessantes para análise sociológica. Diferentemente dos aplicativos de transporte urbano sob demanda, sua proposta está baseada no compartilhamento de viagens intermunicipais e interestaduais, conectando condutores e passageiros que realizam trajetos semelhantes (Blablacar, 2018). Ao fazê-lo, a plataforma cria condições para que indivíduos sem vínculos prévios compartilhem não apenas custos de deslocamento, mas também experiências, conversas, percepções e formas temporárias de convivência durante o percurso da viagem.

Foi justamente essa dimensão relacional que motivou a pesquisa exploratória originalmente desenvolvida entre os anos de 2018 e 2019 na rota Pelotas x Porto Alegre, no Rio Grande do Sul (RS), publicada posteriormente sob o título “Aplicativo BlaBlaCar: uma comunidade de caronas” (Gomes; Spolle, 2020). Naquele momento, o estudo buscou compreender as dinâmicas interpessoais produzidas durante viagens compartilhadas, focalizando as formas de socialização que emergiam a partir da mediação tecnológica proporcionada pelo aplicativo.

Entretanto, o contexto de 2026 apresenta diferenças significativas em relação ao período da pesquisa original. A pandemia de COVID-19 alterou temporariamente padrões de deslocamento e interação social; as plataformas digitais consolidaram-se como infraestruturas centrais da vida cotidiana; e o próprio BlaBlaCar ampliou sua atuação, passando a integrar serviços de comercialização de passagens rodoviárias e consolidando sua posição no ecossistema da mobilidade digital. Além disso, observa-se a crescente utilização dessas plataformas como estratégia de geração complementar de renda, fenômeno associado aos processos mais amplos de plataformização do trabalho.

Diante dessas transformações, o presente capítulo propõe revisitar os registros empíricos produzidos na pesquisa original, reinterpretando-os à luz dos debates contemporâneos sobre plataformas digitais, mediação algorítmica, confiança digital e capitalismo de plataforma. Não se trata de reproduzir integralmente as análises anteriormente realizadas, mas de promover uma releitura crítica do material empírico, articulando-o com questões que ganharam centralidade nos últimos anos.

Assim, o objetivo deste capítulo consiste em analisar de que maneira a mobilidade compartilhada mediada pelo aplicativo BlaBlaCar produz formas específicas de interação social, confiança e cooperação entre desconhecidos, contribuindo para a compreensão das transformações contemporâneas nas relações entre tecnologia, mobilidade e sociabilidade. Ao fazê-lo, pretende-se inserir a experiência observada na rota Pelotas x Porto Alegre em um debate mais amplo sobre os impactos sociais da inovação tecnológica e da crescente presença das plataformas digitais na organização da vida cotidiana.

2. PLATAFORMAS DIGITAIS, MEDIAÇÃO ALGORÍTMICA E MOBILIDADE COMPARTILHADA

As transformações tecnológicas observadas nas primeiras décadas do século XXI produziram alterações significativas nas formas de organização da vida social. O avanço da conectividade digital, a ampliação do acesso à internet móvel e a consolidação das plataformas digitais como mediadoras de atividades econômicas e sociais redefiniram práticas relacionadas ao consumo, ao trabalho, à comunicação e à mobilidade. Nesse cenário, as plataformas digitais deixaram de atuar apenas como ferramentas tecnológicas para assumir papel central na coordenação de fluxos de pessoas, informações, mercadorias e serviços.

Segundo Van Dijck, Poell e De Waal (2018), a chamada sociedade das plataformas caracteriza-se pela crescente dependência de infraestruturas digitais capazes de organizar interações sociais por meio de sistemas automatizados de coleta, processamento e circulação de dados. Nessa perspectiva, plataformas digitais não constituem meros espaços de encontro entre usuários, mas estruturas sociotécnicas que condicionam comportamentos, estabelecem regras de interação e produzem formas específicas de organização social.

O crescimento de aplicativos voltados à mobilidade compartilhada representa uma das expressões mais visíveis desse fenômeno. Serviços como Uber, 99, inDrive e BlaBlaCar passaram a intermediar deslocamentos que anteriormente eram organizados por mecanismos presenciais, redes pessoais ou sistemas tradicionais de transporte. Mais do que conectar oferta e demanda, essas plataformas criam ambientes digitais nos quais a circulação de pessoas depende da produção contínua de informações, avaliações, classificações e mecanismos de reputação.

Nesse contexto, torna-se relevante compreender o BlaBlaCar não apenas como uma comunidade de caronas, conforme frequentemente apresentado em seus materiais

institucionais, mas como uma plataforma digital inserida em processos mais amplos de transformação tecnológica e reorganização das relações sociais. A interação entre condutores e passageiros não ocorre de forma espontânea ou desvinculada da tecnologia. Ao contrário, ela é previamente estruturada por sistemas digitais que regulam a visibilidade dos usuários, organizam os critérios de busca, definem mecanismos de segurança e produzem indicadores de confiabilidade.

2.1. DA ECONOMIA COMPARTILHADA AO CAPITALISMO DE PLATAFORMA

Quando o BlaBlaCar iniciou suas operações no Brasil, grande parte das interpretações sobre o fenômeno das caronas pagas estava associada às noções de economia compartilhada e consumo colaborativo. Sob essa perspectiva, plataformas digitais seriam instrumentos capazes de otimizar o uso de recursos ociosos, permitindo que indivíduos compartilhassem bens, serviços e experiências de forma mais eficiente (Bostman; Rogers, 2011).

Essa interpretação exerceu forte influência nos primeiros estudos sobre mobilidade compartilhada, especialmente porque enfatizava aspectos relacionados à cooperação, à sustentabilidade e à redução de custos. No caso das caronas pagas, a proposta consistiria no compartilhamento de assentos vagos em veículos particulares, possibilitando benefícios simultâneos para motoristas e passageiros.

Contudo, a literatura mais recente tem problematizado os limites dessa interpretação. Para Srnicek (2018), muitas das organizações inicialmente apresentadas como representantes da economia compartilhada migraram para modelos de negócios baseados na exploração econômica de dados, na intermediação digital de atividades e na construção de mercados organizados por plataformas. Nesse contexto, emerge o conceito de capitalismo de plataforma, entendido pelo autor como uma nova forma de organização econômica em que dados, algoritmos e infraestruturas digitais tornam-se recursos centrais para a geração de valor (Srnicek, 2018).

Sob essa perspectiva, plataformas como o BlaBlaCar não apenas conectam usuários interessados em realizar um mesmo trajeto. Elas coletam informações, produzem classificações, organizam fluxos de confiança e controlam os mecanismos de interação entre os participantes. A plataforma passa a ocupar posição estratégica como intermediadora das relações sociais e econômicas estabelecidas entre os usuários.

A própria trajetória do BlaBlaCar identifica esse movimento. Se inicialmente sua atuação concentrava-se na intermediação de caronas pagas, ao longo dos anos a empresa ampliou suas atividades para outros segmentos da mobilidade, incluindo a comercialização de passagens rodoviárias e a integração de diferentes modalidades de transporte em um mesmo ambiente digital. Esse processo revela uma dinâmica de expansão típica das plataformas contemporâneas, que tendem a ampliar continuamente os serviços ofertados e a capacidade de gerenciamento dos fluxos de usuários.

2.2. CONFIANÇA DIGITAL E SISTEMAS REPUTACIONAIS

Um dos aspectos mais relevantes para compreender o funcionamento das plataformas de mobilidade compartilhada diz respeito à construção da confiança entre indivíduos que não possuem vínculos prévios. Diferentemente das relações estabelecidas em ambientes familiares ou em redes pessoais de conhecimento mútuo, as interações promovidas por plataformas digitais frequentemente conectam pessoas completamente desconhecidas.

No caso do BlaBlaCar, a realização de uma viagem compartilhada pressupõe que condutores e passageiros aceitem dividir um espaço físico restrito durante lapso considerável de tempo (por vezes, várias horas), e, *a priori*, sem qualquer contato anterior. Tal situação envolve incertezas relacionadas à segurança, ao comportamento dos participantes e à confiabilidade das informações disponibilizadas pelos usuários.

Para reduzir essas incertezas, as plataformas desenvolvem sistemas reputacionais baseados em avaliações, comentários, verificações de identidade e históricos de utilização. Esses mecanismos funcionam como dispositivos simbólicos de produção de confiança, permitindo que os usuários construam expectativas sobre os comportamentos de pessoas desconhecidas entre si.

Van Dijck, Poell e De Waal (2018) observam que tais sistemas constituem elementos centrais da governança das plataformas digitais. Ao converter experiências subjetivas em indicadores quantificáveis, as plataformas criam mecanismos de coordenação social que orientam escolhas e influenciam decisões dos usuários. Assim, avaliações positivas, perfis completos e históricos consistentes tornam-se recursos valiosos para ampliar a credibilidade dos participantes.

Nesse sentido, os algoritmos não apenas organizam informações. Eles desempenham papel ativo na produção de confiança, selecionando conteúdos, hierarquizando perfis e

definindo quais usuários terão maior visibilidade dentro da plataforma. A confiança, portanto, deixa de depender exclusivamente de relações interpessoais diretas e passa a ser parcialmente mediada por sistemas digitais de classificação e reputação.

Essa dimensão torna-se particularmente relevante para a análise das experiências observadas na rota Pelotas x Porto Alegre. Conforme discutido nas seções seguintes, diversos episódios relatados pelos participantes evidenciam que a decisão de aceitar uma carona, compartilhar trajetos frequentes ou estabelecer interações mais profundas durante as viagens está diretamente associada às informações produzidas e disponibilizadas pela plataforma. Assim, compreender a lógica dos sistemas reputacionais torna-se fundamental para analisar as formas de sociabilidade produzidas pela mobilidade compartilhada mediada digitalmente.

3. CAMINHOS METODOLÓGICOS

Este capítulo retoma uma pesquisa exploratória realizada entre 2018 e 2019 sobre as interações sociais produzidas pela utilização da plataforma digital BlaBlaCar na rota Pelotas x Porto Alegre, no território do RS. O objetivo da investigação consistiu em compreender como indivíduos sem vínculos prévios estabelecem formas de convivência, comunicação e compartilhamento de experiências durante viagens mediadas por uma plataforma digital de mobilidade. Trata-se de uma pesquisa qualitativa de inspiração etnográfica, fundamentada na observação participante de situações concretas de deslocamento compartilhado. A utilização da expressão “inspiração etnográfica” busca reconhecer que o estudo não corresponde a uma etnografia clássica de longa duração, mas aproxima-se dessa tradição ao privilegiar a observação direta das interações sociais e a produção de registros sistemáticos das experiências vivenciadas.

A produção dos dados ocorreu a partir de viagens realizadas pela própria autora na condição simultânea de usuária da plataforma e pesquisadora. Durante a investigação foram realizadas observações em nove viagens diferentes, intermediadas pelo aplicativo BlaBlaCar, contemplando deslocamentos nos sentidos Pelotas x Porto Alegre e Porto Alegre x Pelotas, sendo oito trajetos no período de 2018-2019 e um no ano de 2026. Dessas experiências, quatro foram selecionadas para análise mais detalhada, reunindo quatorze participantes observados, além da própria pesquisadora. A escolha da rota justifica-se pelo intenso fluxo de estudantes, trabalhadores e profissionais que realizam deslocamentos recorrentes entre os

dois municípios, constituindo um contexto privilegiado para a observação das formas de sociabilidade produzidas pela mobilidade compartilhada.

Os dados foram produzidos mediante observação participante e elaboração de diário de campo. Após cada viagem, registraram-se informações relativas ao perfil dos participantes, aos temas predominantes das conversas, às dinâmicas de interação observadas, às situações de conflito e aos elementos associados à construção de confiança entre os usuários. Conforme destacam Beaud e Weber (2007), o diário de campo constitui instrumento fundamental da pesquisa etnográfica ao permitir não apenas o registro dos acontecimentos, mas também a reflexão sobre a posição ocupada pelo pesquisador no contexto investigado. Optou-se por não realizar gravações nem entrevistas estruturadas, tanto por razões éticas quanto pela percepção de que a consciência dos participantes acerca da pesquisa alterava significativamente a espontaneidade das interações observadas.

Na presente versão do estudo, elaborada em 2026, os registros produzidos entre 2018 e 2019 foram revisitados a partir dos debates contemporâneos sobre plataformas digitais, mediação algorítmica, confiança digital e capitalismo de plataforma. Embora os dados empíricos permaneçam os mesmos da investigação original, a interpretação proposta desloca o foco analítico para compreender o BlaBlaCar como uma infraestrutura sociotécnica de mobilidade compartilhada. Como limitações, reconhecem-se o reduzido número de observações realizadas, a concentração em uma única rota regional e a impossibilidade de generalização estatística dos resultados. Ainda assim, o caráter exploratório da pesquisa oferece elementos relevantes para a compreensão das formas de sociabilidade produzidas por plataformas digitais e para o desenvolvimento de investigações futuras sobre mobilidade, tecnologia e interação social.

4. A ROTA PELOTAS X PORTO ALEGRE COMO LABORATÓRIO DE SOCIABILIDADES DIGITAIS

Os registros produzidos durante as viagens observadas entre 2018 e 2019 permitem compreender a rota Pelotas x Porto Alegre como um espaço privilegiado para a observação das formas de sociabilidade produzidas por plataformas digitais de mobilidade compartilhada. Embora o deslocamento constitua o objetivo imediato dos usuários, a experiência da carona paga ultrapassa a simples realização de um percurso físico, criando condições para o

estabelecimento de interações entre indivíduos que, em circunstâncias ordinárias, dificilmente teriam contato entre si.

Nas viagens observadas, os participantes apresentavam perfis sociais bastante distintos. Havia estudantes universitários, servidores públicos, profissionais da área da saúde, aposentados, advogados, docentes e pequenos comerciantes, oriundos de diferentes municípios e trajetórias de vida. Ainda assim, durante algumas horas, esses indivíduos compartilhavam um mesmo espaço físico, negociavam regras de convivência e construíam formas temporárias de interação mediadas pela plataforma digital.

Um dos aspectos mais recorrentes observados durante as viagens foi a rápida produção de conversas entre pessoas completamente desconhecidas. Frequentemente, poucos minutos após o início do trajeto, temas relacionados à família, trabalho, relacionamentos afetivos, projetos profissionais e experiências pessoais passaram a ocupar o centro das interações. Em determinados casos, os diálogos permaneceram superficiais; em outros, assumiram caráter mais íntimo, permitindo que os participantes compartilhassem preocupações, expectativas e opiniões que normalmente seriam reservadas a círculos sociais mais próximos.

As observações sugerem que a própria configuração temporal da viagem favorece esse tipo de interação. Diferentemente dos encontros cotidianos marcados pela continuidade das relações, a carona paga constitui um encontro delimitado por um período relativamente curto e previamente conhecido pelos participantes. Tal característica parece reduzir determinados constrangimentos sociais, criando um ambiente em que conversas sobre temas pessoais podem surgir com relativa facilidade. O compartilhamento do percurso produz, ainda que temporariamente, uma situação de convivência que aproxima indivíduos socialmente distantes.

Ao mesmo tempo, os registros evidenciam que a sociabilidade produzida durante as viagens não ocorre de forma homogênea ou necessariamente harmoniosa. As interações observadas também revelaram divergências políticas, conflitos de valores e disputas simbólicas entre os participantes. Em uma das viagens realizadas durante o contexto eleitoral de 2018, por exemplo, posicionamentos divergentes acerca de políticas públicas, universidades federais e ações afirmativas geraram desconfortos perceptíveis entre alguns integrantes do grupo. Embora os conflitos não tenham interrompido a viagem nem produzido situações de hostilidade aberta, demonstraram que a plataforma não elimina diferenças

sociais e ideológicas; ao contrário, cria condições para que indivíduos detentores de visões de mundo distintas compartilhem temporariamente o mesmo espaço de convivência.

Em outros episódios, observou-se movimento inverso. O reconhecimento de afinidades políticas, religiosas ou profissionais funcionou como elemento facilitador da interação. Uma das viagens realizadas às vésperas das eleições presidenciais de 2018 foi marcada por intensa participação dos ocupantes do veículo, que rapidamente identificaram posições políticas semelhantes e passaram a compartilhar preocupações, expectativas e interpretações acerca do cenário nacional. A convergência de opiniões contribuiu para a construção de um ambiente de maior descontração, ampliando o nível de engajamento dos participantes nas conversas.

Outro aspecto relevante refere-se à confiança necessária para que essas interações ocorram. Diferentemente de formas tradicionais de deslocamento coletivo, como ônibus intermunicipais, a experiência da carona paga pressupõe uma convivência mais intensa entre motorista e passageiros. Os usuários aceitam ingressar em veículos particulares conduzidos por pessoas desconhecidas, compartilhar trajetos (por vezes, de longa duração), e, frequentemente, revelar aspectos significativos de suas trajetórias pessoais.

Nesse contexto, os relatos dos próprios participantes evidenciam a importância dos mecanismos reputacionais disponibilizados pela plataforma. Comentários, avaliações positivas, histórico de viagens e informações presentes nos perfis funcionam como elementos centrais na construção da sensação de segurança. Repetidamente, os usuários mencionaram consultar avaliações anteriores antes de confirmar uma reserva ou oferecer uma vaga, demonstrando que a confiança necessária para a realização da viagem é construída antes mesmo do encontro presencial.

As observações também indicam que a utilização da plataforma não se limita ao compartilhamento eventual de custos de deslocamento. Entre os participantes identificaram-se usuários que realizavam viagens frequentes entre cidades distintas em razão de atividades profissionais, acadêmicas ou familiares. Alguns utilizavam o aplicativo semanalmente, transformando-o em parte integrante de suas estratégias de mobilidade. Tal constatação torna-se particularmente relevante quando observada frente às transformações ocorridas na década de 2020. Se durante o período da pesquisa original predominavam narrativas associadas ao rateio de despesas, atualmente é possível identificar situações em que determinados condutores incorporam os deslocamentos recorrentes à sua estratégia de

geração de renda, aproximando-se de fenômenos mais amplos de plataformização do trabalho.

Nesse sentido, a rota Pelotas x Porto Alegre revela-se mais do que um simples corredor de deslocamento regional. Ela constitui um espaço de observação privilegiado das formas contemporâneas de sociabilidade mediadas por tecnologias digitais. Ao conectar indivíduos desconhecidos por meio de sistemas algorítmicos de reputação e confiança, o BlaBlaCar produz experiências que articulam mobilidade, interação social e mediação tecnológica, oferecendo importantes elementos para compreender os impactos da plataformização sobre a vida cotidiana.

5. REVISITANDO O BLABLACAR EM 2026

Retomar uma pesquisa realizada anos após sua conclusão permite observar um dos movimentos centrais apontados por Mills (1969): a necessidade de relacionar experiências individuais a transformações históricas mais amplas. Se, no momento da investigação original, as caronas pagas apareciam sobretudo como experiências cotidianas de mobilidade e sociabilidade, sua reinterpretação em 2026 possibilita situá-las em processos mais abrangentes relacionados à plataformização da economia, às transformações do trabalho e à crescente mediação tecnológica das relações sociais.

Quando as observações que deram origem à pesquisa original foram realizadas, entre 2018 e 2019, o BlaBlaCar ainda era amplamente percebido pelos seus usuários como uma ferramenta destinada ao compartilhamento de custos de deslocamento. A maior parte dos participantes observados relatava utilizar a plataforma para reduzir despesas associadas às viagens, especialmente combustível e pedágios, ou para encontrar alternativas economicamente mais vantajosas em comparação ao transporte rodoviário convencional. Embora alguns usuários realizassem deslocamentos frequentes, predominava a percepção de que a carona constituía uma prática complementar à mobilidade cotidiana, e não uma atividade econômica estruturada.

Entretanto, passados alguns anos, ao revisitar o campo em 2026, o contexto da mobilidade compartilhada apresenta características distintas. As transformações observadas na década de 2020 foram marcadas pela consolidação das plataformas digitais como infraestruturas permanentes da vida social, pela ampliação dos processos de plataformização do trabalho e pela crescente incorporação de estratégias digitais de geração de renda ao

cotidiano de milhões de pessoas. Nesse cenário, torna-se possível observar novas dinâmicas de utilização do BlaBlaCar que extrapolam os limites originalmente associados ao simples compartilhamento de despesas.

Entre os usuários contemporâneos da plataforma, não é incomum encontrar condutores que realizam trajetos regulares e sistemáticos entre cidades próximas ou integradas por intensos fluxos de deslocamento, conforme observado pela autora em viagens recentes no mesmo percurso. Em rotas como Pelotas–Porto Alegre, por exemplo, a recorrência de estudantes, trabalhadores, profissionais liberais e servidores públicos cria condições favoráveis para a formação de circuitos relativamente estáveis de mobilidade. Em alguns casos, a oferta frequente de vagas em veículos particulares passa a representar uma forma complementar de obtenção de renda, ainda que formalmente a plataforma mantenha a diretriz de compartilhamento de custos como princípio orientador de sua atuação (Blablacar, 2018; 2026).

Tal fenômeno dialoga com processos mais amplos de transformação do mundo do trabalho. Conforme observa Srnicek (2018), o capitalismo de plataforma caracteriza-se justamente pela crescente utilização de infraestruturas digitais para organizar atividades econômicas anteriormente realizadas por meios convencionais. A mediação tecnológica permite conectar oferta e demanda de forma rápida, reduzir custos de transação e ampliar o alcance das relações econômicas. Nesse contexto, as fronteiras entre consumo, prestação de serviços e trabalho tornam-se progressivamente mais difusas.

A experiência observada no BlaBlaCar aproxima-se dessa dinâmica. Ainda que a plataforma não opere sob o mesmo modelo de aplicativos de transporte urbano, como Uber ou 99, sua utilização recorrente por determinados condutores sugere a existência de formas híbridas de mobilidade, nas quais compartilhamento de custos, conveniência logística e geração de renda coexistem em graus variados. A carona deixa de representar apenas uma estratégia de economia e passa a integrar arranjos mais complexos de organização da vida cotidiana.

Outro aspecto relevante diz respeito às transformações produzidas pela pandemia de COVID-19. Os anos posteriores a 2020 foram marcados por alterações significativas nos padrões de deslocamento e interação social. Inicialmente, as medidas de distanciamento físico impactaram diretamente atividades baseadas na convivência prolongada em espaços fechados, como as viagens compartilhadas. Posteriormente, com a retomada da circulação de

pessoas, observou-se uma reconfiguração dos fluxos de mobilidade, impulsionada pela flexibilização das formas de trabalho, pelo crescimento dos deslocamentos intermunicipais e pela busca por alternativas de transporte percebidas como mais flexíveis ou economicamente acessíveis.

Paralelamente, o próprio BlaBlaCar ampliou sua atuação para além das caronas pagas. Conforme já se observava em 2020, a plataforma passou a atuar também na comercialização de passagens rodoviárias (Blablacar, 2026), incorporando novas funcionalidades e consolidando-se como um ecossistema digital voltado à mobilidade terrestre. Esse movimento revela uma tendência característica das grandes plataformas digitais contemporâneas: a expansão contínua dos serviços oferecidos e o fortalecimento de sua posição como intermediadoras dos fluxos econômicos e sociais.

Sob essa perspectiva, revisitar as observações realizadas entre 2018 e 2019 permite perceber que o fenômeno das caronas pagas adquiriu novos significados ao longo do tempo. Se anteriormente o interesse analítico concentrava-se sobretudo nas formas de sociabilidade produzidas pela convivência temporária entre desconhecidos, atualmente torna-se igualmente relevante observar como essas mesmas plataformas participam da reorganização das estratégias de trabalho, renda e mobilidade em uma sociedade crescentemente estruturada por infraestruturas digitais.

Mais do que conectar pessoas que desejam realizar o mesmo trajeto, plataformas como o BlaBlaCar passaram a integrar processos mais amplos de reorganização da vida econômica e social. Nesse contexto, a carona paga deixa de representar apenas uma experiência de deslocamento coletivo e passa a constituir um exemplo das múltiplas formas pelas quais a inovação tecnológica redefine práticas cotidianas, relações de confiança e estratégias de inserção econômica no século XXI.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao revisitar uma pesquisa exploratória realizada entre 2018 e 2019 sobre a utilização do aplicativo BlaBlaCar na rota Pelotas–Porto Alegre, este capítulo procurou compreender como plataformas digitais de mobilidade produzem formas específicas de interação social entre indivíduos sem vínculos prévios. Os registros analisados evidenciaram que as caronas pagas não se limitam à função instrumental do deslocamento, constituindo espaços temporários de convivência nos quais são negociadas identidades, opiniões, experiências

pessoais e percepções sobre o mundo social. Nesse sentido, a plataforma atua como mediadora de encontros que dificilmente ocorreriam fora daquele contexto específico de mobilidade.

A análise também permitiu deslocar o foco interpretativo originalmente centrado nas noções de consumo colaborativo para uma compreensão mais ampla das plataformas digitais como infraestruturas sociotécnicas. A interação entre motoristas e passageiros mostrou-se inseparável dos mecanismos algorítmicos que organizam perfis, avaliações, sistemas reputacionais e critérios de visibilidade. Assim, a confiança necessária para que desconhecidos compartilhem trajetos de longa duração não decorre apenas das relações interpessoais construídas durante a viagem, mas também dos dispositivos digitais que antecedem e estruturam esses encontros.

Ao mesmo tempo, a atualização da reflexão para o contexto de 2026 revelou transformações significativas na própria utilização da plataforma. A consolidação da economia digital, a ampliação dos processos de plataformização e a crescente busca por estratégias complementares de geração de renda contribuíram para atribuir novos significados às caronas pagas. Embora o compartilhamento de custos permaneça como elemento importante da experiência, observa-se a incorporação de lógicas econômicas mais complexas, aproximando determinadas práticas de fenômenos contemporâneos relacionados à reorganização do trabalho e da mobilidade mediada por tecnologias digitais.

Por fim, argumenta-se que o BlaBlaCar constitui um objeto privilegiado para a investigação das relações entre ciência, tecnologia e sociedade, na medida em que evidencia como inovações tecnológicas reconfiguram práticas cotidianas, formas de confiança e modalidades de interação social. Mais do que uma ferramenta de deslocamento, a plataforma revela aspectos centrais das transformações produzidas pela crescente presença de sistemas digitais na organização da vida contemporânea, indicando caminhos promissores para futuras pesquisas sobre mobilidade, sociabilidade e mediação algorítmica.

REFERÊNCIAS

BEAUD, Stéphane; WEBER, Florence. Guia para a pesquisa de campo: produzir e analisar dados etnográficos. Petrópolis: Vozes, 2007.

BLABLACAR. Como funciona o compartilhamento de caronas. Disponível em: https://www.blablacar.com.br/how-does-car-sharing-work. Acesso em: 6 set. 2018.

BLABLACAR. Sobre nós. [S. l.], 2026. Disponível em: https://blog.blablacar.com.br/about-us. Acesso em: 5 jun. 2026.

CASTELLS, Manuel. A sociedade em rede. 25. ed. São Paulo: Paz e Terra, 2021.

GOMES, Mara Beatriz Nunes; SPOLLE, Marcus Vinicius. (2021). APLICATIVO BLABLACAR: UMA COMUNIDADE DE CARONAS. Perspectivas Sociais. 6. 10.15210/rps.v6i1.20217.

MILLS, Charles Wright. A imaginação sociológica. 2. ed. Rio de Janeiro: Zahar, 1969.

SRNICEK, Nick. Capitalismo de plataforma. São Paulo: Autonomia Literária, 2018.

VAN DIJCK, José; POELL, Thomas; DE WAAL, Martijn. The platform society: public values in a connective world. Oxford: Oxford University Press, 2018.

ZUBOFF, Shoshana. A era do capitalismo de vigilância: a luta por um futuro humano na nova fronteira do poder. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2020.

CAPÍTULO X

AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE DIFERENTES FONTES DE DADOS DE COBERTURA DE NUVENS PARA A MODELAGEM DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO BRASILEIRO

ASSESSMENT OF DIFFERENT CLOUD COVER DATA SOURCES FOR MODELING PHOTOVOLTAIC POTENTIAL IN BRAZIL

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-10

Emerson D. Oliveira [1]
Thomás Rocha Ferreira [2]
Carlos Denyson da Silva Azevedo [3]
Mario de Miranda Vilas Boas Ramos Leitão [4]
Maria Luciene Dias de Melo [5]
Manoel G. C. de Lima Pinto [6]

[1] Coordenador do Laboratório de Meteorologia (LabMet). Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF
[2, 5] Professor Adjunto do Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT). Universidade Federal de Alagoas – UFAL
[3] Bolsista de Desenvolvimento Tecnológico (DTC-B). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
[4] Professor Titular no Colegiado de Engenharia Agrícola e Ambiental (CENAMB) – UNIVASF
[6] Técnico Agrícola no Laboratório de Meteorologia (LabMet) – UNIVASF

RESUMO

Neste trabalho, utilizou-se um modelo simplificado de transmitância atmosférica, baseado na lei de Beer-Lambert, para analisar a variabilidade da radiação solar incidente à superfície (SSR) no Brasil a partir de cinco fontes de dados de cobertura de nuvens (CMIP6, ERA5, NCEP, ISCCP e EUMETSAT). O desempenho da SSR modelada foi avaliado frente aos dados observacionais do *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD) de 1983 a 2009. Os campos de média anual indicaram concordância espacial: os maiores valores de SSR concentraram-se no semiárido nordestino e os menores na Amazônia. Na escala anual, o ISCCP apresentou maior concordância com o BR-DWGD, enquanto o NCEP registrou os maiores desvios. A análise do erro quadrático médio (RMSE) evidenciou variabilidade sazonal, destacando o CMIP6 e o EUMETSAT nos equinócios, e o ISCCP com o menor RMSE anual (16,9 W/m²). A análise de agrupamento hierárquico confirmou que os dados de nuvens do EUMETSAT e do CMIP6 são os mais semelhantes e precisos, enquanto o NCEP permaneceu como o menos consistente. Os mapas de irradiância global horizontal ratificaram esses padrões. Os resultados ressaltam a importância da seleção criteriosa de bases de dados para modelar o recurso solar no Brasil, posicionando ISCCP, EUMETSAT e CMIP6 como as opções mais confiáveis.

Palavras-chave: Cobertura de Nuvens. Radiação Solar à Superfície. Sensoriamento Remoto. Modelos do CMIP6. Potencial Fotovoltaico.

ABSTRACT

In this study, a simplified atmospheric transmittance model based on the Beer-Lambert law was used to analyze the variability of surface solar radiation (SSR) across Brazil using five cloud cover data sources (CMIP6, ERA5, NCEP, ISCCP, and EUMETSAT). The performance of the modeled SSR datasets was evaluated against observational data from the *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD) for the 1983–2009 period. The annual mean fields revealed spatial consistency: the highest SSR values were systematically concentrated in the northeastern semi-arid region, whereas the lowest values occurred in the Amazon region. On an annual scale, the ISCCP product showed the highest agreement with BR-DWGD, while NCEP reanalysis exhibited the largest deviations. Root mean square error (RMSE) analysis highlighted seasonal performance variability, with CMIP6 and EUMETSAT

excelling during equinoxes, and ISCCP achieving the lowest annual RMSE (16.9 W/m²). Hierarchical cluster analysis confirmed that EUMETSAT and CMIP6 cloud data were the most similar and accurate, while NCEP remained the least consistent. Global horizontal irradiance maps corroborated these spatial patterns. These findings underscore the critical importance of rigorous dataset selection for solar resource modeling in Brazil, establishing ISCCP, EUMETSAT, and CMIP6 as the most reliable options.

Keywords: Cloud Cover. Surface Solar Radiation. Remote Sensing. CMIP6 models. Photovoltaic Potential.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a quantificação precisa da radiação solar incidente à superfície (Surface Solar Radiation — SSR) consolidou-se como um elemento crucial tanto para a compreensão do sistema climático terrestre quanto para o planejamento e operação de sistemas de conversão de energia solar fotovoltaica (FV). Contudo, a estimativa precisa da SSR é altamente complexa devido à atenuação sofrida pela radiação solar ao atravessar a atmosfera terrestre, provocada por processos de absorção e espalhamento por gases estufa, aerossóis e, sobretudo, pela cobertura de nuvens (Bird e Riordan, 1986; Wild et al., 2005).

Diversos trabalhos da literatura científica têm investigado as divergências e incertezas associadas aos dados de cobertura de nuvens provenientes de diferentes fontes, como produtos de reanálise, observações orbitais e modelos de circulação geral (Free et al., 2016; Chakraborty e Lee, 2021; Wu et al., 2023). Por exemplo, Free et al. (2016) demonstraram que, embora os produtos de reanálise reproduzam satisfatoriamente a variabilidade e as tendências temporais da nebulosidade, eles frequentemente subestimam a quantidade de nuvens quando comparados a observações de superfície. De forma análoga, Wu et al. (2023) avaliaram a cobertura total e de nuvens altas em quatro bases de reanálise (ERA-Interim, ERA5, MERRA-2 e NCEP) em relação aos dados do sensor MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) no período de 2001 a 2018. Embora tenham verificado coerência espacial e temporal ampla, identificaram discrepâncias acentuadas em regiões de alta altitude e em latitudes polares. Não obstante, Chakraborty e Lee (2021) apontaram a existência de vieses positivos sistemáticos na estimativa da radiação de onda curta à superfície, atribuindo tais divergências prioritariamente à variabilidade intermodelo no tratamento do fracionamento de nuvens.

No âmbito da transição energética global e das mitigações das mudanças climáticas, simulações baseadas no Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP) têm sido amplamente empregadas sob a abordagem de conjuntos (ensembles) para projetar os

impactos das mudanças climáticas no potencial de geração fotovoltaica (Wild et al., 2015; Danso et al., 2022; Isaza et al., 2023; Nwokolo et al., 2023; Ha et al., 2023). Danso et al. (2022), por exemplo, utilizaram cenários do CMIP6 para demonstrar uma tendência de redução do potencial fotovoltaico na África Ocidental, associada ao declínio da SSR provocado por alterações na dinâmica de nebulosidade e na espessura óptica dos aerossóis. Por sua vez, Ha et al. (2023) destacaram a necessidade de incorporar projeções climáticas atualizadas (CMIP5 versus CMIP6) e cenários socioeconômicos (Shared Socioeconomic Pathways — SSPs) para subsidiar estratégias sustentáveis de expansão da energia solar.

Atualmente, o mercado fotovoltaico é dominado por tecnologias baseadas em silício monocristalino (Mono-Si), silício policristalino (Poly-Si) e filmes finos (Vunnam et al., 2021). A viabilidade técnica e financeira desses empreendimentos depende rigorosamente de estimativas confiáveis do recurso solar local e de suas oscilações sazonais. No contexto brasileiro, Silva et al. (2021) demonstraram o impacto da precisão dos dados solares na análise de viabilidade econômica da expansão de sistemas fotovoltaicos e instituições de ensino multicampus, ressaltando a sensibilidade do tempo de retorno financeiro (payback) às variações de irradiância simuladas.

Adicionalmente aos efeitos da nebulosidade, os aerossóis atmosféricos desempenham papel relevante no balanço radiativo. Conforme documentado por Wild et al. (2005), observou-se uma diminuição global de 4% a 6% na SSR entre as décadas de 1950 e 1980 devido ao aumento do material particulado antropogênico (fenômeno conhecido como global dimming). Conforme salientado por Isaza et al. (2023), os aerossóis atuam como espalhadores (ex., sulfatos e aerossóis marinhos) ou absorvedores (ex., carbono negro), alterando substancialmente a radiação incidente. Tais interações introduzem incertezas adicionais nos modelos climáticos globais (Collins et al., 2013; Wang et al., 2021).

Além da variabilidade radiativa, fatores térmicos influenciam diretamente a eficiência de conversão dos módulos fotovoltaicos. Como demonstrado por Dubey et al. (2013), a elevação da temperatura operacional dos painéis solares resulta na degradação da sua eficiência nominal, tornando ainda mais crítica a determinação precisa do balanço de radiação e das condições micrometeorológicas regionais.

Diante desse cenário, o presente capítulo tem como objetivo principal avaliar a sensibilidade da modelagem da radiação solar incidente à superfície no território brasileiro em função da escolha da base de dados de cobertura de nuvens. Utilizando um modelo

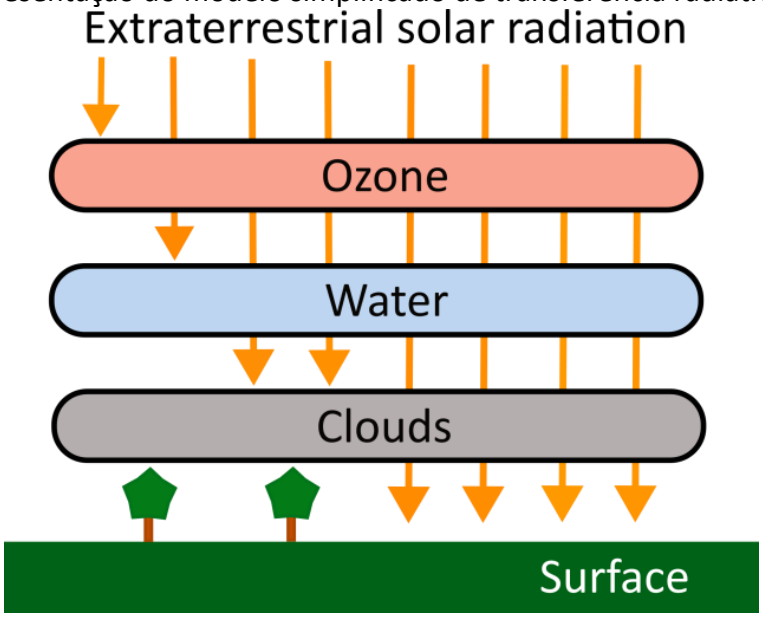
empírico simplificado de transmitância atmosférica baseado na lei de Beer-Lambert, comparam-se estimativas obtidas a partir de cinco bases distintas (produtos de reanálise (ERA5 e NCEP), dados de satélite (ISCCP e EUMETSAT) e o *ensemble* de modelos do CMIP6) com dados observacionais de alta resolução do Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD). Busca-se, assim, identificar as fontes de dados mais adequadas para a quantificação do potencial fotovoltaico no Brasil, fornecendo subsídios técnicos robustos para o planejamento energético nacional.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E METODOLOGIA

2.1. MODELO SIMPLIFICADO DE RADIAÇÃO SOLAR

O modelo empírico de transferência radiativa empregado neste estudo baseia-se em formulações clássicas de céu limpo e atenuadores atmosféricos (Berger, 1978; Bird e Hulstrom, 1981; Bird e Riordan, 1986). A estimativa da radiação solar incidente à superfície (SSR) é estruturada em quatro etapas consecutivas de atenuação radiativa, conforme ilustrado na Figura 1:

Figura 1 – Representação do modelo simplificado de transferência radiativa atmosférica.



Fonte: Autoria própria.

Na primeira etapa, calcula-se a radiação solar no topo da atmosfera (*Solar Radiation at the Top of the Atmosphere* — SRTOA, denotada por I_0) utilizando o programa *Daily INSOLation* (DINSOL-v1.0; Oliveira, 2023). Nas etapas subsequentes, a atenuação da radiação

direta ao atravessar a camada de ozônio e o conteúdo de água precipitável é modelada por meio de uma abordagem simplificada da lei de Beer-Lambert (Equações 1 e 2):

$$\tau_o = e^{-k_o \cdot m_o}$$

$$\tau_w = e^{-k_w \cdot m_w}$$

onde τ_o e τ_w representam, respectivamente, as transmitâncias associadas ao ozônio e ao vapor d'água; k_o e k_w indicam os coeficientes médios de absorção espectral; e m_o e m_w correspondem à espessura da camada de ozônio (em unidades Dobson — DU) e ao conteúdo de água precipitável (em cm), ambos obtidos da base de reanálise do NCEP.

Para contabilizar o efeito da nebulosidade, adotou-se a parametrização simplificada proposta por Oliveira et al. (2019) e Oliveira e Fernandez (2020), na qual a transmitância da camada de nuvens (τ_{cld}) é dada por:

$$\tau_{cld} = 1 - (CLD \cdot \alpha_{cld})$$

sendo *CLD* a fração de cobertura total de nuvens (expressa entre 0 e 1) e α_{cld} o parâmetro de albedo médio representativo das nuvens.

A irradiância solar global líquida à superfície (*I*) é obtida pelo produto acumulado da SRTOA pelas três transmitâncias atmosféricas calculadas (Equação 4):

$$I = I_0 \cdot (\tau_o \cdot \tau_w \cdot \tau_{cld})$$

Os valores das constantes e coeficientes médios adotados no modelo estão sintetizados na Tabela 1. Salienta-se que, enquanto modelos radiativos rigorosos resolvem a equação de transferência espectralmente, a presente abordagem generalizada busca otimizar a eficiência computacional sem perda significativa de precisão para médias climatológicas.

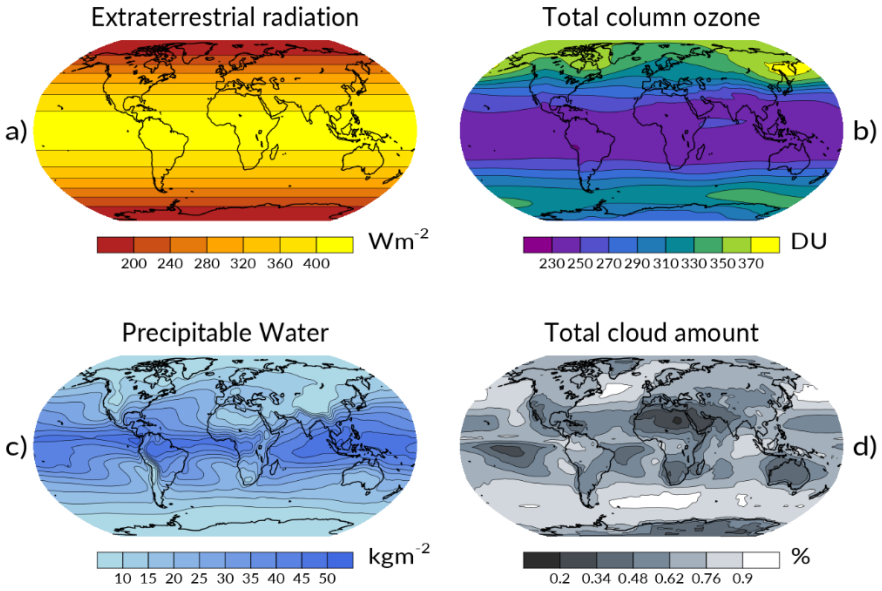
Tabela 1 – Parâmetros e coeficientes de absorção e refletância utilizados nas Equações (1) a (3).

Coeficiente de Absorção do Ozônio (k_o)	Coeficiente de Absorção da Água (k_w)	Albedo Médio das Nuvens (α_{cld})
0,35 cm^{-1}	0,01 cm^{-1}	0,70

Fonte: Autoria própria.

A Figura 2 ilustra os campos médios anuais das variáveis de entrada empregadas na modelagem: a radiação no topo da atmosfera (SRTOA), o ozônio total em coluna, a água precipitável e a cobertura de nuvens derivada do ISCCP.

Figura 2 – Distribuição espacial das médias anuais das variáveis de entrada do modelo radiativo: a) SRTOA (DINSOL); b) Ozônio total em coluna (NCEP); c) Água precipitável (NCEP); d) Fração de cobertura de nuvens (ISCCP).



Fonte: Autoria própria.

2.2. BASES DE DADOS DE COBERTURA DE NUVENS

Com o intuito de avaliar o impacto da fonte de dados de nebulosidade nas estimativas radiativas, foram selecionados cinco conjuntos independentes que podem ser conferidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo dos conjuntos de dados de nuvens empregados neste estudo.

ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project)	Produto orbital histórico de referência global em climatologia de nuvens.
EUMETSAT	Dados de satélite de alta resolução espacial disponibilizados via Climate Data Store (CDS/Copernicus).
ERA5 (ECMWF Reanalysis v5)	Reanálise global de quinta geração do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo.
NCEP/DOE Reanalysis 2	Reanálise atmosférica do National Centers for Environmental Prediction / Department of Energy.
CMIP6 Ensemble	Média do conjunto (*ensemble*) constituída por oito modelos globais do CMIP6 para o experimento histórico (*hist*, 1850–2014) utilizando a variante *r4i1p1f1* (ACCESS-ESM1-5, CanESM5, FGOALS-g3, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2-LR e CESM2).

Fonte: Autoria própria.

2.3. PADRONIZAÇÃO ESPAÇOTEMPORAL E VALIDAÇÃO OBSERVACIONAL

O período de estudo compreendeu o intervalo contínuo de 1983 a 2009 (27 anos), definido pela disponibilidade simultânea de todas as bases, com foco no produto ISCCP. A partir dos dados mensais originais, foram calculadas as médias climatológicas anuais e sazonais: Verão Austral (DJF: Dezembro-Janeiro-Fevereiro), Outono Austral (MAM: Março-Abril-Maio), Inverno Austral (JJA: Junho-Julho-Agosto) e Primavera Austral (SON: Setembro-Outubro-Novembro).

Para harmonizar a resolução espacial, todos os campos foram interpolados para uma grade regular padronizada cobrindo o território brasileiro (longitudes [74,85°W a 34,85°W] e latitudes [33,85°S a 5,35°N]), com resolução de ~0,1° (391 × 393 pontos de grade), empregando os operadores *remapbil* e *remapycon* da ferramenta *Climate Data Operators* (CDO).

A validação dos resultados foi realizada tendo como referência observacional a base de dados em grade BR-DWGD (*Brazilian Daily Weather Gridded Data*; Xavier et al., 2022), construída a partir da interpolação rigorosa de estações de superfície do INMET e da ANA.

A avaliação quantitativa do desempenho incluiu o cálculo do Erro Quadrático Médio (RMSE), definido por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(S_i - O_i)^2}$$

em que N é o número total de pontos de grade no domínio brasileiro, S_i representa o valor simulado pelo modelo radiativo e O_i denota o valor observacional correspondente do BR-DWGD.

Complementarmente, aplicou-se a técnica de Agrupamento Hierárquico (*Hierarchical Cluster Analysis*) sobre a matriz de distâncias euclidianas dos valores de RMSE sazonais e anuais, empregando o método de ligação completa (*complete linkage*) para classificar o grau de similaridade entre os conjuntos de dados.

2.4. ESTIMATIVA DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO

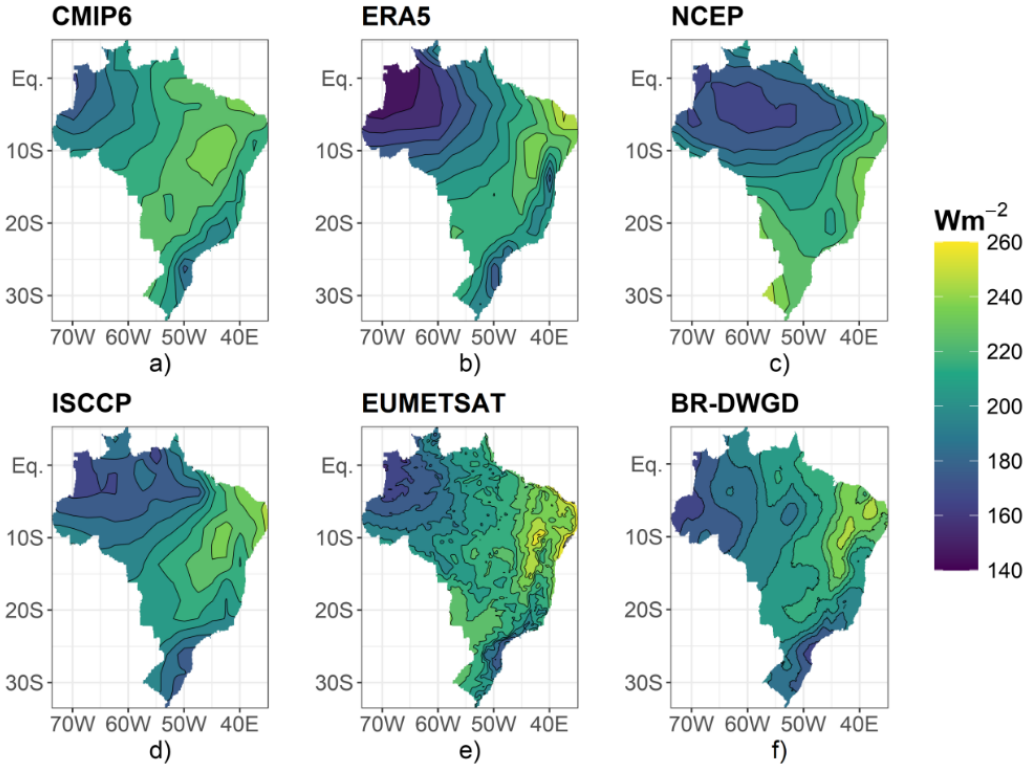
O Potencial de Energia Fotovoltaica (*Photovoltaic Power Potential* — PPP, em kWh/m²) foi estimado a partir da conversão da irradiância média simulada em W/m², multiplicando-se pelo período diário de 24 horas e dividindo-se pelo fator de escala de 1000 W/kW. A Irradiância Global Horizontal (GHI) obtida reflete o recurso solar disponível para conversão energética em superfície.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E COMPARAÇÃO COM DADOS OBSERVACIONAIS

A Figura 3 apresenta os campos médios anuais da radiação solar incidente à superfície (SSR) simulados com as cinco fontes de dados de nebulosidade (Figuras 3a–e) e o campo observacional de referência BR-DWGD (Figura 3f).

Figura 3 – Média anual da radiação solar à superfície (SSR, W/m^2) para o período 1983-2009: a) CMIP6; b) ERA5, c) NCEP; d) ISCCP; e) EUMETSAT; f) Observado (BR-DWGD).

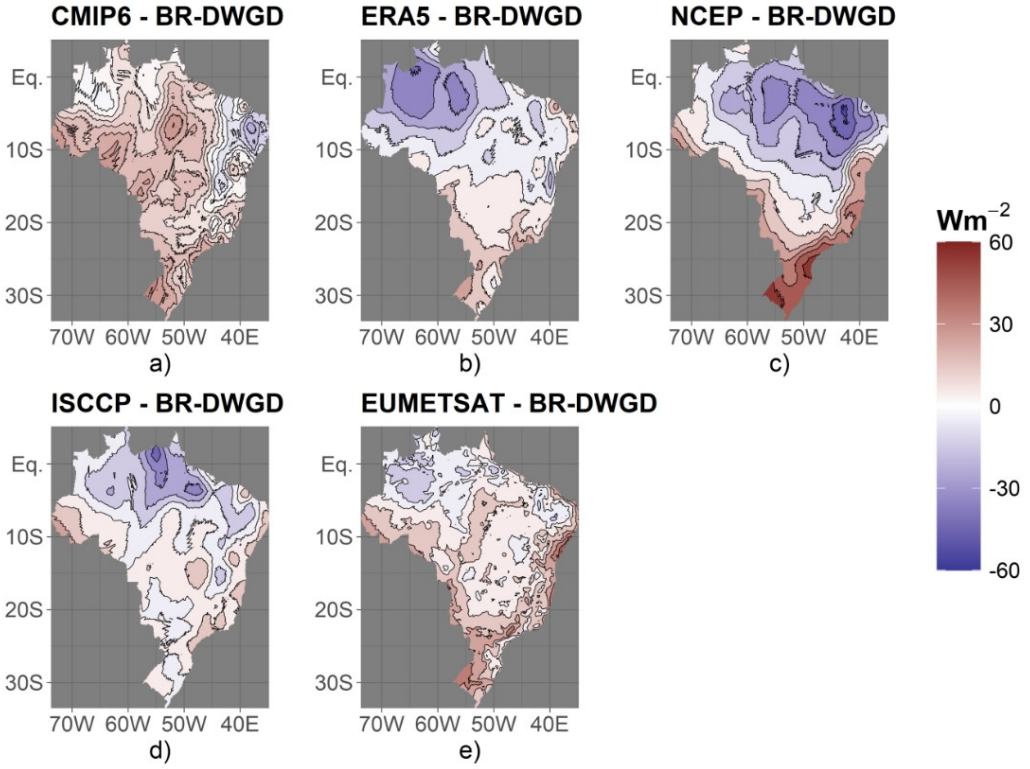


Fonte: Autoria própria.

Observa-se que as simulações baseadas no CMIP6 (Fig. 3a), ISCCP (Fig. 3d) e EUMETSAT (Fig. 3e) reproduzem com elevada fidelidade o padrão espacial do BR-DWGD (Fig. 3f). Conforme esperado (Pereira et al., 2017), os máximos absolutos de SSR situam-se no semiárido do Nordeste brasileiro (>220 W/ m²), caracterizado por alta insolação e reduzida nebulosidade acumulada. Em contrapartida, os mínimos radiativos ocorrem na Região Amazônica (<170 W/m²), em virtude da intensa cobertura de nuvens convectivas associada à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e à bacia hidrográfica.

Dentre as reanálises, o ERA5 (Fig. 3b) apresentou os menores valores médios absolutos de SSR, enquanto o NCEP (Fig. 3c) exibiu as maiores distorções estruturais nas linhas de contorno em relação ao BR-DWGD. Os dados do EUMETSAT (Fig. 3e), por possuírem maior resolução espacial nativa (~0,5°), geraram contornos mais detalhados, registrando contudo valores ligeiramente elevados na faixa litorânea do Nordeste. Os mapas de anomalia (Diferença = Simulado − Observado) estão expostos na Figura 4:

Figura 4 – Mapas de diferença de SSR anual (W/m^2) entre os dados modelados e o BR-DWGD: a) CMIP6 – Obs; b) ERA5 – Obs; c) NCEP – Obs; d) ISCCP – Obs; e) EUMETSAT – Obs.



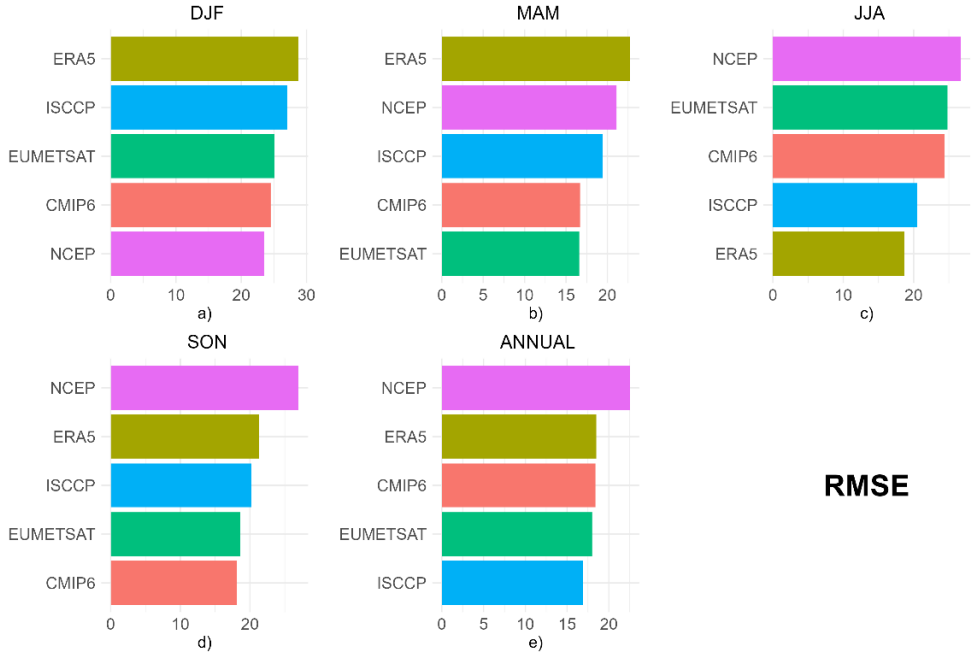
Fonte: Autoria própria.

O conjunto CMIP6 (Fig. 4a) apresentou leve superestimativa sistemática sobre a maior parte do país, com exceção do Nordeste. O ERA5 (Fig. 4b) manteve divergências próximas de zero no Centro-Sul, mas subestimou fortemente a SSR na calha amazônica. O ISCCP (Fig. 4d) exibiu o melhor ajuste global, com viés residual mínimo em quase todo o território, exceto por pequenos desvios opostos no oeste do Acre e na bacia central. O NCEP (Fig. 4c) registrou os maiores desvios, superestimando acentuadamente a SSR no Sul e subestimando-a no Norte.

3.2. AVALIAÇÃO DO ERRO RADIATIVO E VARIABILIDADE SAZONAL

A Figura 5 sintetiza os valores do Erro Quadrático Médio (RMSE) anual e sazonal para cada fonte de nuvens:

Figura 5 – Valores do erro quadrático médio (RMSE, W/m^2) agrupados por estação do ano e média anual: a) DJF; b) MAM; c) JJA; d) SON; e) Anual.



Fonte: Autoria própria.

Na média anual (Fig. 5e), o produto orbital ISCCP obteve a melhor performance, com o menor RMSE (16,9 W/m²), seguido pelo EUMETSAT (18,2 W/m²), CMIP6 (18,9 W/m²) e ERA5 (19,4 W/m²). O NCEP registrou o pior desempenho (22,5 W/m²).

A análise sazonal revela alternâncias significativas no desempenho, que estão resumidas na Tabela 3:

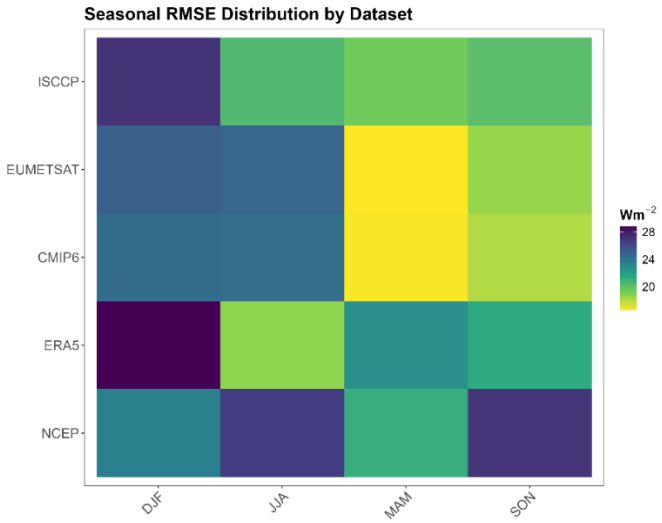
Tabela 3 – Resumo do desempenho sazonal do modelo em relação aos dados observacionais.

Verão (DJF)	O NCEP obteve surpreendentemente o menor RMSE (23,5 W/m²), enquanto o ERA5 apresentou a maior margem de erro (28,8 W/m²).
Outono (MAM)	O EUMETSAT (16,6 W/m²) e o CMIP6 (16,7 W/m²) alcançaram a maior precisão do estudo.
Inverno (JJA)	O ERA5 liderou a precisão (18,7 W/m²), enquanto o NCEP acumulou seu maior erro (26,7 W/m²).
Primavera (SON)	O CMIP6 obteve o melhor ajuste entre todas as bases.

Fonte: Autoria própria.

O mapa de calor (*heatmap*) da Figura 6 evidencia que o CMIP6, ISCCP e EUMETSAT possuem comportamento mais estável ao longo das estações, com desempenhos otimizados durante os equinócios (MAM e SON).

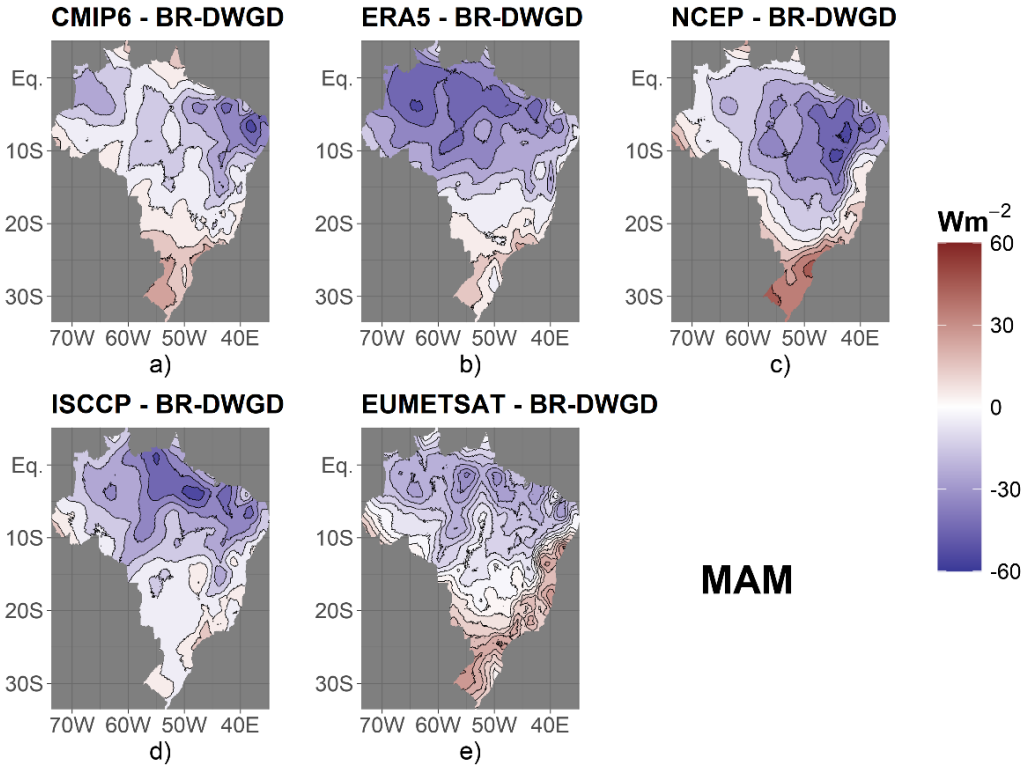
Figura 6 – Mapa de calor (Heatmap) da variabilidade sazonal do RMSE (W/m^2) entre as bases analisadas.



Fonte: Autoria própria.

As diferenças espaciais durante o Outono (MAM) são detalhadas na Figura 7, confirmando a estabilidade do ISCCP, CMIP6 e EUMETSAT e os desvios sistemáticos do NCEP nas regiões Sul e Nordeste do país.

Figura 7 – Distribuição das diferenças de SSR no outono (MAM) em relação ao BR-DWGD.

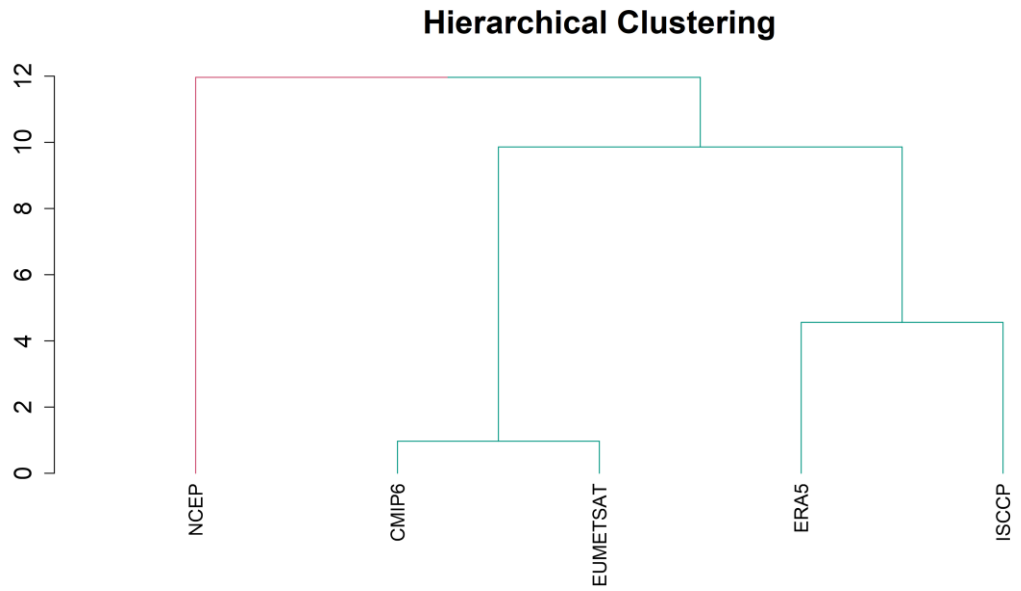


Fonte: Autoria própria.

3.3. AGRUPAMENTO HIERÁRQUICO DAS BASES DE DADOS

A análise de agrupamento hierárquico (Dendrograma da Figura 8) dividiu os conjuntos de dados em grupos bem definidos quanto ao comportamento do erro radiativo:

Figura 8 – Dendograma de agrupamento hierárquico baseado nos erros quadráticos médios sazonais e anuais.



Fonte: Autoria própria.

O primeiro grupo, de maior precisão e similaridade estrutural, é formado pelo EUMETSAT e CMIP6. O grupo intermediário reúne o ISCCP e ERA5, destacando-se o ISCCP pelo viés absoluto mais baixo. Por fim, a reanálise NCEP permaneceu isolada como um elemento dissimilar, apresentando baixa correlação com os demais produtos.

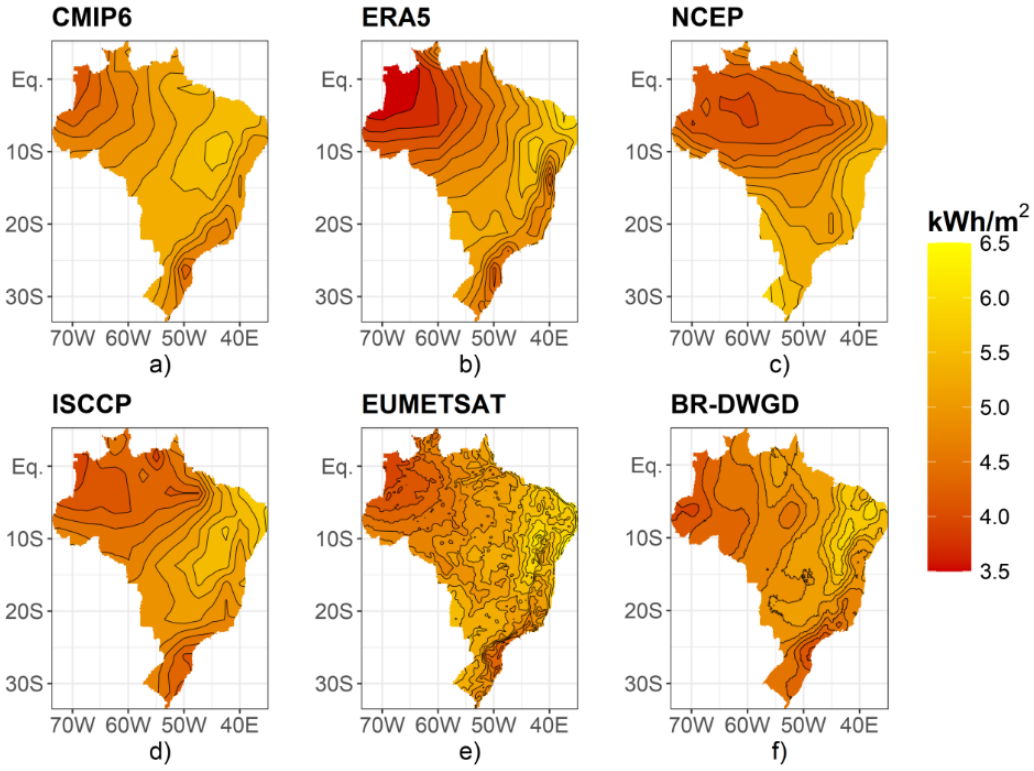
3.4. ANÁLISE DA IRRADIÂNCIA GLOBAL HORIZONTAL (GHI) E DISCUSSÃO FÍSICA

Os mapas de Irradiância Global Horizontal (GHI) resultantes da modelagem estão apresentados na Figura 9. Observa-se que os padrões de GHI corroboram a viabilidade da utilização da modelagem simplificada para mapeamento do potencial fotovoltaico regional. A GHI simulada ratifica a região Nordeste como a área de maior potencial energético do país (>5,6 kWh/m²/dia), enquanto a bacia Amazônica e a Região Sul registram valores entre 4,0 e 4,6 kWh/m²/dia, em pleno acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al., 2017).

A divergência observada no NCEP encontra explicação física fundamental na definição meteorológica da variável de nebulosidade. Conforme estabelecido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM/WMO), deve-se distinguir rigorosamente entre *Quantidade Total de Nuvens* (fração tridimensional considerando camadas sobrepostas) e *Cobertura Total*

de Nuvens (fração bidimensional visível do céu). A reanálise NCEP fornece primariamente a cobertura visível simplificada, o que gera variações abruptas no albedo efetivo e introduz erros sistemáticos no cálculo da transmitância atmosférica (Free et al., 2016; Wu et al., 2023).

Figura 9 – Mapas climatológicos de Irradiância Global Horizontal (GHI, em kWh/m^2/dia) para o Brasil: a) CMIP6; b) ERA5; c) NCEP; d) ISCCP; e) EUMETSAT; f) BR-DWGD.



Fonte: Autoria própria.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo realizou uma avaliação abrangente do emprego de cinco diferentes fontes de dados de cobertura de nuvens para a modelagem da radiação solar incidente à superfície (SSR) e estimativa do potencial fotovoltaico no Brasil. As principais conclusões obtidas são:

1. O modelo simplificado de transmitância atmosférica baseado na lei de Beer-Lambert demonstrou ser uma ferramenta precisa e eficiente para mapear a variabilidade espacial e temporal do recurso solar em escala nacional.
2. Na escala anual, o produto derivado de satélite **ISCCP** apresentou a maior concordância global com a base de validação BR-DWGD, registrando o menor erro quadrático médio (RMSE = 16,9 W/m²). Os produtos **EUMETSAT** e o *ensemble* do **CMIP6** demonstraram desempenho superior e consistente, especialmente durante as estações transicionais (equinócios).

3. A reanálise do **NCEP** revelou-se inadequada para o mapeamento detalhado da SSR no Brasil, apresentando desvios expressivos decorrentes de incompatibilidades conceituais no tratamento da fração de nuvens.
4. Os mapas de Irradiância Global Horizontal (GHI) obtidos fornecem alternativas confiáveis para estimar o potencial fotovoltaico em regiões com escassez de estações meteorológicas de superfície, tais como a Bacia Amazônica.

Recomenda-se que futuros projetos de mapeamento solar e dimensionamento de usinas fotovoltaicas no Brasil priorizem dados de nebulosidade obtidos por sensoriamento remoto orbital (ISCCP e EUMETSAT) ou projeções do CMIP6, garantindo maior confiabilidade técnica nas avaliações do potencial energético sustentável.

REFERÊNCIAS

Berger, A. Long-term variations of daily insolation and Quaternary climate changes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35(12), 2362–2367, 1978. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1978)035<2362:LTVODI>2.0.CO;2

Bird, R. E., & Hulstrom, R. L. *A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces* (SERI/TR-642-761). Solar Energy Research Institute, Golden, 1981. CO. http://dx.doi.org/10.2172/6510849

Bird, R. E., & Riordan, C. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 25(1), 87–97, 1986. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025<0087:SSSMFD>2.0.CO;2

Chakraborty, T., & Lee, X. Large differences in diffuse solar radiation among current-generation reanalysis and satellite-derived products. *Journal of Climate*, 34(16), 6635–6650, 2021. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0979.1

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J. L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W. J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A. J., & Wehner, M. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC* (pp. 1029–1136). Cambridge University Press, 2013.

da Silva, O. A. V. de O. L., Moita Neto, J. M., Lira, M. A. T., & Morais, F. H. M. Expansion of photovoltaic systems in multicampi higher education institutions: Evaluation and guidelines. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 56(4), 697–709. 2021. https://doi.org/10.5327/Z217694781009

Danso, D. K., Anquetin, S., Diedhiou, A., Lavaysse, C., Hingray, B., Raynaud, D., & Kobea, A. T. (2022). A CMIP6 assessment of the potential climate change impacts on solar

photovoltaic energy and its atmospheric drivers in West Africa. *Environmental Research Letters*, 17(4), 044023. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5a67

Dubey, S., Sarvaiya, J. N., & Seshadri, B. Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world – A review. *Energy Procedia*, 33, 311–321, 2013. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.072

Free, M., Sun, B., & Yoo, H. L. Comparison between total cloud cover in four reanalysis products and cloud measured by visual observations at U.S. weather stations. *Journal of Climate*, 29(6), 2015–2021, 2016. https://doi.org/10.1175/ JCLI-D-15-0637.1

Ha, S., Zhou, Z., Im, E. S., & Lee, Y. M. Comparative assessment of future solar power potential based on CMIP5 and CMIP6 multi-model ensembles. *Renewable Energy*, 206, 324–335, 2023. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.039

Isaza, A., Kay, M., Evans, J. P., Prasad, A., & Bremner, S. Maximizing photovoltaic potential and minimizing costs in a future warmer climate: The role of atmospheric aerosols and greenhouse gas emissions. *Renewable Energy*, 219(Part 2), 119561, 2023. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119561

Martins, F. R., Abreu, S. L., & Pereira, E. B. Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil. *Energy Policy*, 48, 640–649, 2012 https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.082

Nwokolo, S. C., Ogbulezie, J. C., & Ushie, O. J. (2023). A multi-model ensemble-based CMIP6 assessment of future solar radiation and PV potential under various climate warming scenarios. *Optik*, 285, 170956, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.170956

Oliveira, E. D. Daily INSOLation (DINSOL-v1.0): An intuitive tool for classrooms and specifying solar radiation boundary conditions. *Geoscientific Model Development*, 16(9), 2371–2390, 2023. https://doi.org/10.5194/ gmd-16-2371-2023

Oliveira, E. D., & Fernandez, J. H. Um novo modelo climático simplificado: Global resolved energy balance with galactic cosmic rays (GREB-GCR) theory. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(2), 842–854, 2020. https://doi.org/ 10.26848/rbgf.v13.2.p842-854

Oliveira, E. D., Fernandez, J. H., Mendes, D., Spyrides, M. H. C., & Gonçalves, W. A. (2019). Validação de um modelo climático simplificado adaptado para simular os efeitos do aumento da concentração de CO2 associados à teoria dos raios cósmicos galácticos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12(3), 768–778, 2019. https://doi.org/10.26848/ rbgf.v12.3.p768-778

Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. L., Rüther, R., Abreu, S. L. de, Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., & Souza, J. G. de. *Atlas Brasileiro de Energia Solar* (2a ed., 80 p.), INPE, 2017. http://doi.org/ 10.34024/978851700089

Souza, R. M. A., Leitão, M. V. B. R., Oliveira, G. M., Oliveira, E. D., & Correia, L. T. Demanda hídrica e adubação orgânica no cultivo protegido de pimentão na região norte da Bahia. *Irriga*, 26(4), 787–800, 2021. https://doi.org/ 10.15809/irriga.2021v26n4p787-800

Vunnam, S., VanithaSri, M., & Rama Koteswara Rao, A. (2021). Performance analysis of mono crystalline, poly crystalline and thin film material based 6 × 6 T-C-T PV array under different partial shading situations. *Optik*, 248, 168055. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.168055

Wang, Z., Lin, L., Xu, Y., Che, H., Zhang, X., Zhang, H., Dong, W., Wang, C., Gui, K., & Xie, B. Incorrect Asian aerosols affecting the attribution and projection of regional climate change in CMIP6 models. *npj Climate and Atmospheric Science*, 4(2), 2021. https://doi.org/10.1038/s41612-020-00159-2

Wild, M., Folini, D., Henschel, F., Fischer, N., & Müller, B. Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. *Solar Energy*, 116, 12–24, 2015. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.039

Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A., Ohmura, A., Long, C. N., Dutton, E. G., Forgan, B., Kallis, A., Russak, V., & Tsvetkov, A. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface. *Science*, 308(5723), 847–850, 2005. https://doi.org/10.1126/science.1103215

Wu, H., Xu, X., Luo, T., Yang, Y., Xiong, Z., & Wang, Y. Variation and comparison of cloud cover in MODIS and four reanalysis datasets of ERA-interim, ERA5, MERRA-2 and NCEP. *Atmospheric Research*, 281, 106477, 2023. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106477

Xavier, A. C., Scanlon, B. R., King, C. W., & Alves, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). *International Journal of Climatology*, 42(16), 8390–8404, 2021. https://doi.org/10.1002/joc.7731

CAPÍTULO XI

SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E A PEGADA HÍDRICA TOTAL: UM ESTUDO DOS NÍVEIS DE ESCASSEZ, DA APROPRIAÇÃO DA ÁGUA E DA POLUIÇÃO NA SUB-BACIA DO RIO MIRIRI LOCALIZADA NO ESTADO DA PARAÍBA

ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY AND THE TOTAL WATER FOOTPRINT: A STUDY OF WATER SCARCITY LEVELS, WATER ALLOCATION, AND POLLUTION IN THE MIRIRI RIVER SUB-BASIN LOCATED IN THE STATE OF PARAÍBA

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-11

Ana Beatriz de Andrade [1]
Allan Sarmento Vieira [2]
Maria Eduarda Anacleto de Melo [3]
Ian Lucas Arruda da Silva [4]
Francisco Lopes de Souza Neto [5]

[1] Graduanda do curso de Administração. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
[2] Professor Doutor em Recursos Naturais e Graduando em Direito. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
[3] Graduanda do curso de Administração. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
[4] Graduando do Curso de Ciências Contábeis. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
[5] Graduando do Curso de Direito. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo principal a análise da sustentabilidade ambiental com base na determinação da pegada hídrica total na Sub-bacia do Rio Miriri/PB, tomando como referência o ano de 2024. Para isso, foram realizadas estimativas para mensurar as componentes azul, verde e cinza dos principais usuários da água nos diferentes setores da sociedade, sendo eles: o abastecimento, a pecuária, a irrigação e o saneamento. Quanto à metodologia utilizada, podemos classificá-la como quali-quantitativa, pela razão de contemplar a coleta de dados dos planos diretores, estudos de caso e ainda estabelecer uma relação entre variáveis propostas para possibilitar a inferência dos resultados sob a perspectiva ambiental. A partir da análise dos resultados obtidos, foi possível identificar que os setores de irrigação e do saneamento são os que possuem o maior consumo de água, ou seja, a maior pegada hídrica dentre os demais setores analisados. Ao analisar conjuntamente os demais resultados, podemos inferir que a sub-bacia estudada apresenta sinais de sustentabilidade ambiental, quando analisados os índices de escassez, da apropriação da água e da poluição numa escala anual, portando, no entanto é visível que alguns meses são considerados críticos, sendo imperativo adotar medidas racionais que possam racionalizar o uso e promover a otimização da água na área estuda. Contudo, a utilidade da pegada hídrica total é factível no auxílio dos gestores públicos, em uma possível tomada de decisão, especialmente, quando buscam fortalecer o Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos com o objetivo de alcançar uma governança sustentável.

Palavras-chave: Pegada Hídrica Total. Escassez. Apropriação. Poluição. Sustentabilidade Ambiental.

ABSTRACT

The primary objective of this study is to analyze environmental sustainability by determining the total water footprint in the Miriri River Sub-basin (PB), using the year 2024 as a reference. To this end, estimates were made to measure the blue, green, and gray components of the main water users across different sectors of society, namely: water

supply, livestock, irrigation, and sanitation. As for the methodology used, it can be classified as quali-quantitative, since it involves collecting data from master plans and case studies, as well as establishing a relationship between proposed variables to enable the inference of results from an environmental perspective. Based on the analysis of the results obtained, it was possible to identify that the irrigation and sanitation sectors are those with the highest water consumption—that is, the largest water footprint among the other sectors analyzed. By analyzing the other results collectively, we can infer that the sub-basin studied shows signs of environmental sustainability when scarcity, water abstraction, and pollution indices are analyzed on an annual scale; however, it is evident that certain months are considered critical, making it imperative to adopt rational measures that can rationalize water use and promote water optimization in the study area. However, the total water footprint can be a useful tool for public officials in their decision-making, especially when they seek to strengthen the Water Resources Management System with the goal of achieving sustainable governance.

Keywords: Total Water Footprint. Scarcity. Water Use. Pollution. Environmental Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por recursos hídricos, proveniente do aumento populacional e do aprimoramento dos processos produtivos tem comprometido seriamente a sustentabilidade dos recursos naturais, evidenciando a necessidade de uma gestão eficiente e consciente desses recursos. Em escala global, as atividades humanas exercem grande influência sobre o consumo de água, tornando essencial compreender como se dá esse uso e identificar as regiões que mais pressionam os sistemas hídricos.

Nesse cenário, indicadores de escassez despontam como ferramentas indispensáveis para mensurar o impacto antrópico nas bacias hidrográficas, fornecendo informações fundamentais para a formulação de estratégias que ajudem a reduzir a crise hídrica mundial e consolidar uma gestão mais sustentável da água.

A disponibilidade de água doce no Brasil, embora abundante, enfrenta sérias dificuldades de distribuição, especialmente na Região Nordeste, onde fatores como a má distribuição e a irregularidade das chuvas agravam a escassez hídrica. Além disso, questões como degradação ambiental, poluição e o aumento constante da demanda intensificam o quadro de estresse hídrico, especialmente nas regiões semiáridas (Ferreira, 2014). Nesse contexto, torna-se fundamental adotar tecnologias sociais de armazenamento de água e utilizar indicadores como a pegada hídrica. Esses instrumentos possibilitam um diagnóstico mais preciso do consumo e da disponibilidade de água, favorecendo ações mais assertivas para o uso racional e sustentável desse recurso essencial, além de fortalecer as políticas de gestão hídrica no país (Lima, 2014).

Diversos pesquisadores têm se dedicado ao estudo dos impactos da escassez hídrica, desenvolvendo métodos precisos para sua mensuração. Entre esses métodos, destaca-se o conceito de "pegada hídrica", proposto por Hoekstra em 2002. Esse indicador recente tem sido amplamente utilizado para quantificar e qualificar o volume de água doce consumido pelas atividades humanas em diversos setores, proporcionando uma análise detalhada da utilização dos recursos hídricos (Hoekstra, 2003).

A pegada hídrica fundamenta-se no conceito de Água Virtual, proposto por Allan (1998), que engloba toda a água utilizada ao longo do processo produtivo, inclusive aquela que não se encontra incorporada no produto final. Este indicador multidimensional contempla tanto o consumo direto quanto indireto de água, além de considerar os níveis de poluição gerados e a quantidade necessária para diluição desses poluentes, oferecendo, assim, uma avaliação abrangente dos impactos hídricos relacionados às cadeias produtivas e ao consumo.

Sob essa perspectiva, Albuquerque (2013) descreve as três componentes essenciais que compõem o cálculo da pegada hídrica total de determinada entidade ou atividade produtiva: pegada azul, referente aos volumes consuntivos de água doce extraídos de corpos hídricos superficiais e subterrâneos; pegada verde, que diz respeito aos volumes de água provenientes do balanço hídrico do solo (incluindo precipitação armazenada e utilizada pelas plantas); e pegada cinza, que corresponde ao volume de água necessário para diluir poluentes gerados por efluentes domésticos, industriais e outras atividades humanas até níveis que atendam aos padrões de qualidade estabelecidos.

Considerando o contexto econômico contemporâneo, a gestão eficiente da água tornou-se um fator estratégico para a competitividade e sustentabilidade das atividades produtivas, uma vez que busca mitigar os impactos da escassez hídrica sobre os processos industriais e agrícolas. Nesse cenário, destaca-se a iniciativa do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), que objetiva fomentar o uso racional e sustentável dos recursos hídricos nas empresas brasileiras. Entre as ações previstas está a criação de um índice de mercado da pegada hídrica, inspirado no Índice de Carbono Eficiente, lançado em 2009 em parceria com a Bolsa de Valores de São Paulo (B3). Tal instrumento pretende estimular as empresas a adotarem práticas de gestão hídrica mais conscientes e alinhadas aos princípios da sustentabilidade (Empinotti & Jacobi, 2013; BNDES, 2011).

Nesse contexto, a análise dos níveis de redução da pegada hídrica e da insustentabilidade associada ao consumo de água em uma bacia hidrográfica torna-se

estratégica para subsidiar a formulação de políticas de gestão mais eficazes, capazes de mitigar a vulnerabilidade dos sistemas hídricos frente ao crescimento da demanda e aos impactos ambientais. A partir desse cenário, formula-se a seguinte questão central para investigação: a pegada hídrica total, mensurada sob a perspectiva ambiental, revela um nível de insustentabilidade capaz de comprometer o consumo de água na Sub-bacia do Rio Miriri localizada no litoral do Estado da Paraíba?

Assim o objetivo geral desta pesquisa é determinar a pegada hídrica total e os níveis de escassez, de apropriação da água e de poluição, nos diferentes setores da sociedade na Sub-bacia do Rio Miriri/PB, para o ano de 2024, para analisar a sua sustentabilidade sob o aspecto ambiental.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ao longo das últimas décadas, diversos pesquisadores têm dedicado esforços ao desenvolvimento de indicadores capazes de mapear, quantificar e monitorar a problemática da água em escala global. Entretanto, observa-se que ainda não há um método universalmente aceito para avaliar a compatibilidade entre a oferta e a demanda hídrica em diferentes contextos geográficos e temporais (PROCHNOW et al., 2012; DRASTIG et al., 2010). A análise dessa congruência entre disponibilidade e consumo é essencial para diagnosticar níveis de escassez, o que se torna particularmente relevante diante das crescentes pressões antrópicas e das mudanças climáticas globais, que alteram significativamente os regimes hidrológicos e afetam a segurança hídrica mundial.

Nesse cenário, destaca-se a importância de instrumentos mais abrangentes, como a pegada hídrica, que permite mensurar de forma holística o impacto do consumo humano sobre os recursos hídricos, considerando tanto a água azul, verde e cinza. Embora seja um conceito relativamente recente (LEÃO, 2013), seu uso tem despertado interesse crescente em diferentes setores da sociedade e do meio empresarial, uma vez que oferece subsídios para aprimorar a gestão sustentável dos recursos hídricos. Vale ressaltar que, apesar da existência de outras metodologias para contabilizar o uso da água em determinada região, a pegada hídrica se destaca por integrar dimensões quantitativas e qualitativas, influenciando diretamente na formulação de estratégias mais assertivas de preservação ambiental e eficiência do uso da água.

Nesse sentido, diversos estudos têm sido fundamentais para consolidar o potencial e a aplicabilidade da pegada hídrica como ferramenta de gestão e sustentabilidade. Silva et al. (2013) apontaram consenso na literatura científica sobre a capacidade desse indicador em monitorar pressões antrópicas sobre os recursos naturais. Maracajá et al. (2014), ao analisar o consumo hídrico na Paraíba, evidenciaram que a média anual da pegada hídrica per capita é de 796 m³, sendo a mesorregião do Cariri a de menor consumo. Por sua vez, Hoekstra et al. (2011) elaboraram um manual metodológico que sistematiza a avaliação da pegada hídrica em três eixos: contabilização, sustentabilidade e formulação de respostas.

Em outros contextos, Vieira e Junior (2015) demonstraram que intervenções antrópicas na infraestrutura do pré-sal elevaram a pegada hídrica total do litoral norte paulista a 400 Mm³/ano, destacando a preponderância da água cinza (85%). Candido e Alves (2018) defenderam a regulamentação da pegada hídrica como instrumento estratégico de planejamento, ressaltando seu papel para mensurar a escassez hídrica e apoiar projetos sustentáveis que considerem dimensões econômicas e sociais, incluindo setores como agricultura, indústria e abastecimento urbano.

No ambiente empresarial, Cirne e Vieira (2019) evidenciaram, ao analisar uma indústria de sorvetes no semiárido paraibano, que a substituição de insumos de maior pegada hídrica por alternativas mais eficientes poderia reduzir significativamente o impacto hídrico do produto final. Palhares et al. (2021) observaram resultado semelhante ao avaliarem o sistema de produção de carne bovina: conhecer a pegada hídrica do gado possibilita ajustes no manejo, gerando ganhos de eficiência e sustentabilidade. Complementarmente, Vieira et al. (2022) verificaram que, embora a sub-bacia do rio Taperoá apresente sustentabilidade anual, em nível mensal ocorre insustentabilidade de junho a novembro, revelando a importância de análises em diferentes escalas temporais para o gerenciamento hídrico eficaz.

Contribuições recentes enriquecem ainda mais o debate. Li et al. (2023) trouxeram à tona a pegada hídrica associada ao treinamento de modelos de inteligência artificial, destacando um novo vetor de pressão sobre os recursos hídricos até então pouco explorado na literatura. Já Koellner, Berger e Murray (2023) propuseram a integração entre os impactos da escassez hídrica e da poluição na avaliação da pegada hídrica, ampliando a capacidade dessa métrica em refletir não apenas volumes absolutos consumidos, mas também seus efeitos sobre a qualidade e disponibilidade da água para diferentes usos.

Dessa forma, observa-se que a utilização da pegada hídrica, quando associada a metodologias robustas e regulamentação adequada, representa não apenas uma métrica de consumo, mas uma ferramenta estratégica para apoiar políticas públicas, orientar práticas produtivas mais responsáveis e mitigar os riscos associados à escassez de água, especialmente em regiões vulneráveis.

3. METODOLOGIA

O presente estudo integrou diferentes abordagens e técnicas de pesquisa, de modo a garantir, por um lado, maior abrangência na análise dos dados e, por outro, reduzir possíveis vieses subjetivos nas interpretações, no caso foi utilizado o método dedutivo e pode ser classificada como uma pesquisa quali-quantitativa. No entanto, foram utilizados ainda, diversos instrumentos de entendimento conceitual e de coleta de dados, como artigos acadêmicos, livros, documentos técnicos e fontes institucionais, entre os quais se destaca o Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba (PERH-PB, 2021).

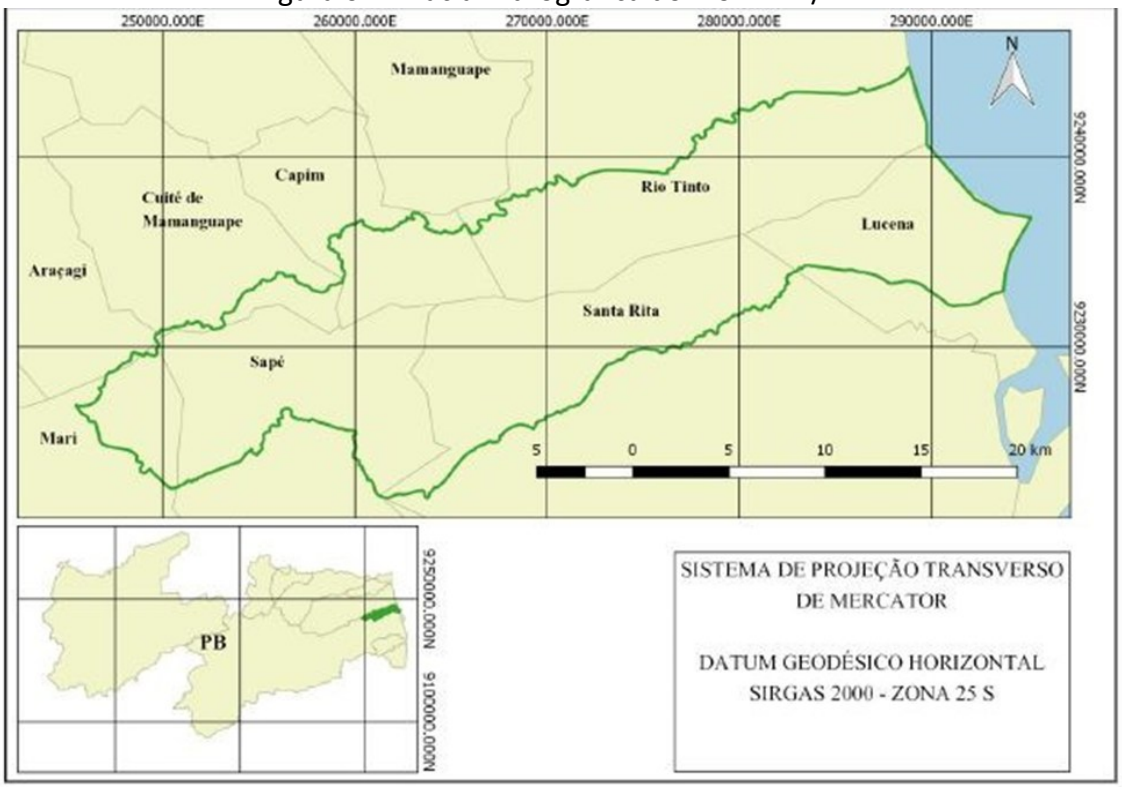
Na perspectiva de estimar a pegada hídrica total da região estudada, considerou-se não apenas a distribuição hídrica convencional, mas também o impacto das tecnologias sociais de captação, armazenamento e distribuição de água. Nesse processo, estabeleceu-se contato direto com a ASA Paraíba responsável pelas tecnologias sociais, que, em parceria com entidades como a AESA, ASA Brasil e Rede Água, forneceram levantamentos detalhados dessas tecnologias. Essas informações foram incorporadas no cálculo das pegadas hídrica azul e verde, compondo variáveis fundamentais para o desenvolvimento da análise. Em alinhamento com a problemática definida, a investigação seguiu quatro etapas principais: (i) definição do objetivo e escopo da avaliação; (ii) contabilização da pegada hídrica; (iii) avaliação da sustentabilidade; e (iv) formulação de resposta, considerando possíveis medidas de mitigação ou adaptação.

Para tanto, com o levantamento dos níveis de escassez, da apropriação da água e da poluição na sub-bacia estudada e comparada com a pegada hídrica de cada componente de cada setor obtemos a sustentabilidade ambiental. Essa abordagem permitiu avaliar o comportamento da pegada hídrica total da sub-bacia em análise no ano de 2024, possibilitando interpretações sob diversas perspectivas como a escala de tempo anual ou mensal, subsidiando reflexões para formulação de estratégias de gestão e uso sustentável da água.

3.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O rio Miriri está localizado no litoral norte do Estado da Paraíba, na Mesorregião da Zona da Mata, entre os paralelos 6º51’58’’ e 6º52’36’’ de latitude sul e os meridianos 34º54’03’’ e 34º55’19’’ de longitude oeste. No interior da bacia, distribuem-se completa e parcialmente os municípios: Lucena, Mari, Rio Tinto, Santa Rita e Sapé. Sua extensão é de aproximadamente 58,7 Km, que atinge em torno de 37.207 hectares de área.

Figura 01 – Bacia Hidrográfica do Rio Miriri/PB.



Fonte: Costa e Santos (2017).

Tem como principais usos: irrigação, pesca, abastecimento humano e de animais. A umidade relativa do ar, em termos de valores médios anuais, varia de 80% a 85% e os dados pluviométricos indicam que a bacia apresenta precipitações médias anuais entre 900 e 1600 mm. Do ponto de vista geológico, a litologia apresenta uma predominância de terrenos sedimentares, de areias pertencentes ao grupo barreiras, além de mangues e de terrenos que sofrem influência das marés. A vegetação natural dominante na área da bacia do rio Miriri é constituída de florestas Caducifólia, Subcaducifólia e Subperenifólia, ou seja, Floresta Atlântica e ecossistemas associados tais como restingas, cerrados, manguezais.

3.2. MODELO DA PEGADA HÍDRICA TOTAL E INDICADORES

Com base no Manual da Pegada Hídrica, a estimativa da pegada hídrica total na sub-bacia do Rio Miriri/PB, no ano de 2024, foram considerados os principais setores usuários de água: abastecimento humano, saneamento, agricultura irrigada e pecuária. A soma das diferentes componentes da pegada hídrica (azul, verde e cinza) desses setores resultou na pegada hídrica total da sub-bacia, representada pela equação 1:

$$PHtotal\ \left(\frac{m^3}{ano}\right) = PHa + PHi + PHp + PHs\ (1)$$

Sendo que: PHtotal - Pegada Hídrica Total da sub-bacia do Rio Miriri/PB; PHa - Pegada Hídrica do abastecimento urbano e rural; PHi - Pegada Hídrica da agricultura irrigada; PHp - Pegada Hídrica da pecuária; e PHs - Pegada Hídrica associada aos esgotos lançados pelos municípios da sub-bacia.

A sustentabilidade em uma bacia hidrográfica pode ser avaliada sob três perspectivas: ambiental, social e econômica. No caso, a sustentabilidade ambiental exige que a qualidade da água atenda aos critérios pré-estabelecidos e que a quantidade respeite o fluxo mínimo ambiental. Em termos de sustentabilidade social, é necessário garantir o fornecimento mínimo de água doce para atender às necessidades básicas da população. Já para a sustentabilidade econômica, é essencial que a água seja trabalhada numa perspectiva eficiente para que os benefícios gerados pelo seu uso específico superem os custos associados.

Segundo o manual de avaliação da pegada hídrica, o nível de escassez tem correlação a componente da água azul em uma bacia hidrográfica e é determinada pela razão entre a soma das pegadas hídricas azuis totais na bacia hidrográfica (PHazul [x,t]) e a disponibilidade de água azul (DAzul [x,t]) no espaço x e no tempo t, conforme descrito na equação 2.

$$EAazul\ [x,t] = \frac{\sum PHazul[x,t]}{DAazul[x,t]}\ (2)$$

De forma análoga, o nível de apropriação da água verde (EAverde) é obtida conforme equação 3, onde compõe a relação entre a soma das pegadas hídricas verdes totais na bacia hidrográfica (PHverde [x,t]) e a disponibilidade de água azul (DAverde [x,t]) no espaço x e no tempo t:

$$EAverde[x,t] = \frac{\sum PHverde[x,t]}{DAverde[x,t]}\ (3)$$

E por fim, para fechar a avaliação da sustentabilidade ambiental, o indicador local utilizado foi o nível de poluição da água (NPA), que é a relação entre a soma das pegadas hídricas cinzas totais na bacia hidrográfica (PHcinza [x,t]) e a vazão real (Qreal [x,t]) no espaço x e no tempo t, conforme a equação 4:

$$NPA[x,t] = \frac{\sum PHcinza[x,t]}{Qreal[x,t]} \quad (4)$$

Além disso, o nível de poluição também pode ser avaliado considerando a diferença entre a vazão natural (Qn) e a demanda de vazão ambiental, resultando na Qreal [x,t] no tempo t e espaço x, contabilizando a Q90% que é a vazão com 90% de garantia no tempo e permanecendo nos mananciais a vazão ecológica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

É importante destacar que o cálculo da pegada hídrica dos diferentes setores contemplados neste estudo levou em consideração as três componentes dos setores evidenciado e seguiu as etapas previstas na metodologia para determinar a Pegada Hídrica Total da sub-bacia do Rio Miriri/PB para o ano de 2024. Para essas estimativas, procedeu-se ao somatório das componentes azul, verde e cinza, considerando os seguintes setores usuários de água: abastecimento humano, saneamento, agricultura irrigada e pecuária.

Tabela 1 - Pegada Hídrica Total da sub-bacia do Rio Miriri/PB.

SETORES DA ÁGUA CONSIDERADOS	PH AZUL (M^3/ANO)	PH VERDE (M^3/ANO)	PH CINZA (M^3/ANO)	TOTAL POR SETOR (M^3/ANO)
ABASTECIMENTO HUMANO	2.935.763,00			2.935.763,00
SANEAMENTO			69.932.116,00	68.932.116,00
AGRICULTURA IRRIGADA	245.635.652,00	133.350.870,00		378.986.523,00
PECUÁRIA	837.914,00	16.809.943,00		17.677.858,00
PEGADA HÍTRICA TOTAL	249.439.331,00	150.160.814,00	68.932.116	468.532.261,00
PEGADA HÍDRICA DA SUB-BACIA DO RIO MIRIRI (2024)	**468.532.261**			

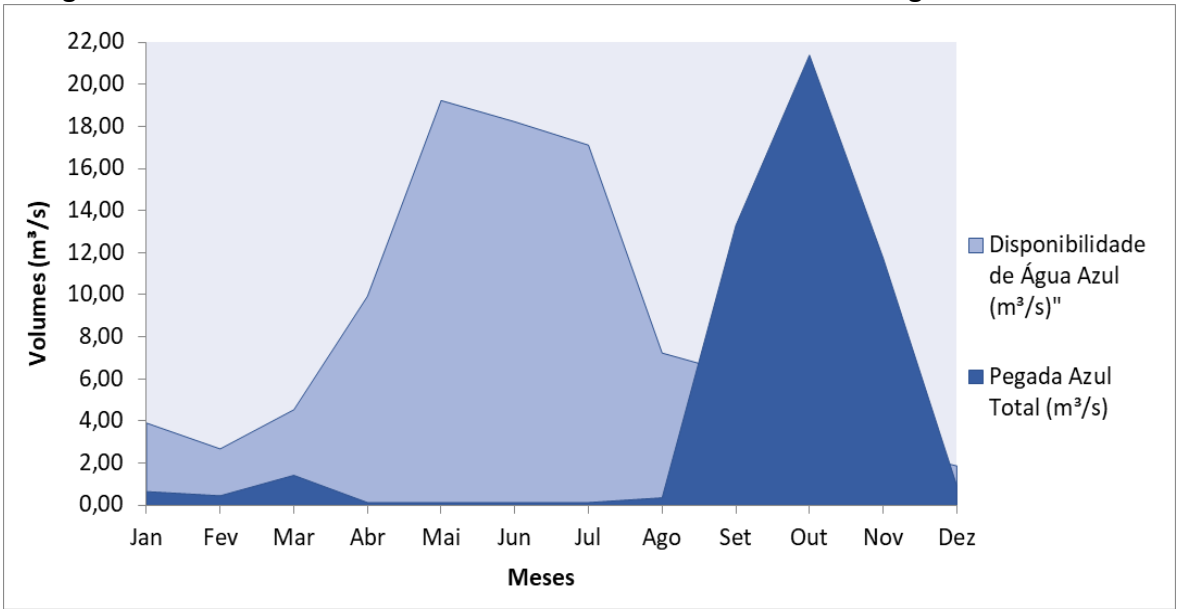
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

No entanto, destaca-se que foram calculadas as diferentes componentes da pegada hídrica na sub-bacia do Rio Miriri/PB, com o objetivo de avaliar o nível de sustentabilidade sob a perspectiva ambiental. As análises seguintes são estruturadas a partir dos resultados obtidos para: pegada hídrica azul, interpretada como indicador de escassez hídrica; pegada hídrica verde, relacionada à fração de apropriação da água de chuva; e pegada hídrica cinza, que representa um indicador de poluição decorrente da carga de efluentes lançados no meio hídrico.

É importante evidenciar ainda que as vazões naturais utilizadas nessas estimativas foram calculadas por meio do modelo Chuva-Vazão SMap.Net, que considerou aproximadamente 43% da área total de drenagem da sub-bacia, além da precipitação média mensal de 2024 (mm), da evapotranspiração média mensal (mm), de um escoamento de base médio estimado em 0,186 m^3/s e de uma capacidade de campo calculada em 43,90%, conforme dados da AESA (2021). É relevante deixar claro que um ponto crítico ambiental em uma sub-bacia é caracterizado pelo momento em que as demandas por água azul e verde ou os padrões de qualidade da água em seu estado natural são excedidos, configurando uma condição de insustentabilidade. Esse cenário se estabelece quando o consumo hídrico ultrapassa 100% da capacidade disponível para atendimento das demandas, comprometendo o equilíbrio ambiental.

Nesse contexto, procedeu-se ao cálculo do nível de escassez de água, cujos resultados possibilitaram a construção do gráfico apresentado na Figura 2, o qual ilustra de forma comparativa a situação da sustentabilidade da água azul na sub-bacia do Rio Miriri/PB ao longo do ano de 2024.

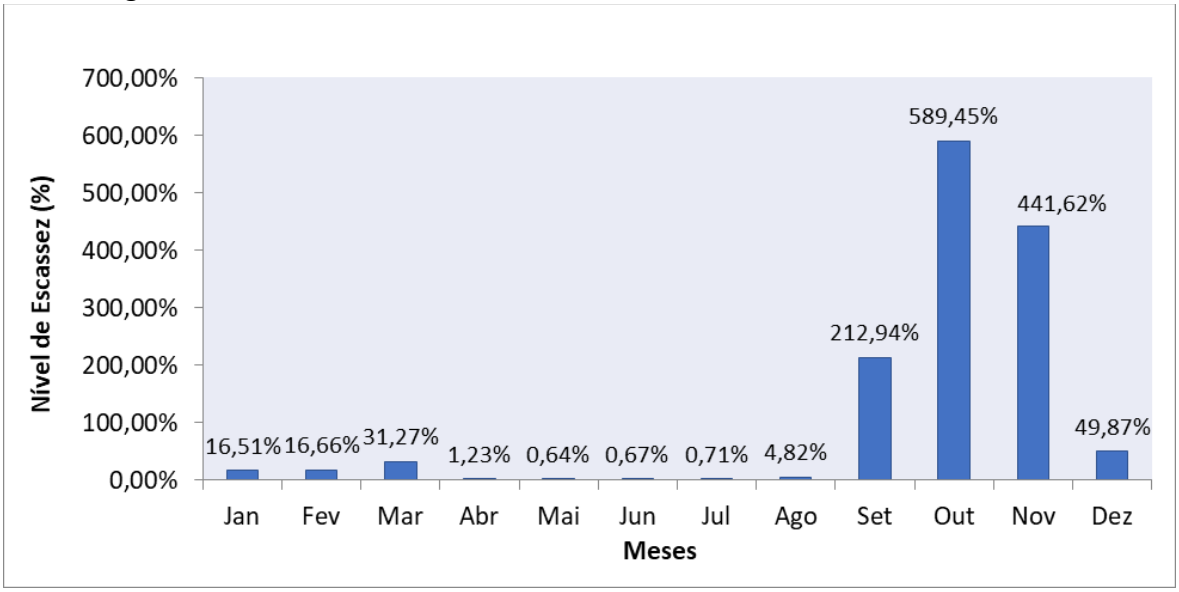
Figura 2 - Análise da sustentabilidade ambiental considerando a Pegada Hídrica Azul.



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Conforme exposto na Figura 2, é possível inferir que o consumo total de água se apresenta insustentável no período de setembro a novembro, uma vez que a pegada hídrica azul nesse período excede a quantidade de água azul disponível. No entanto, ao analisar em uma escala anual, o nível de escassez de água é de 52,15%, indicando que, de forma geral, a região estudada pode ser considerada sustentável ao longo do ano de 2024, conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Análise do nível de escassez hídrica na Sub-bacia do rio Miriri/PB.

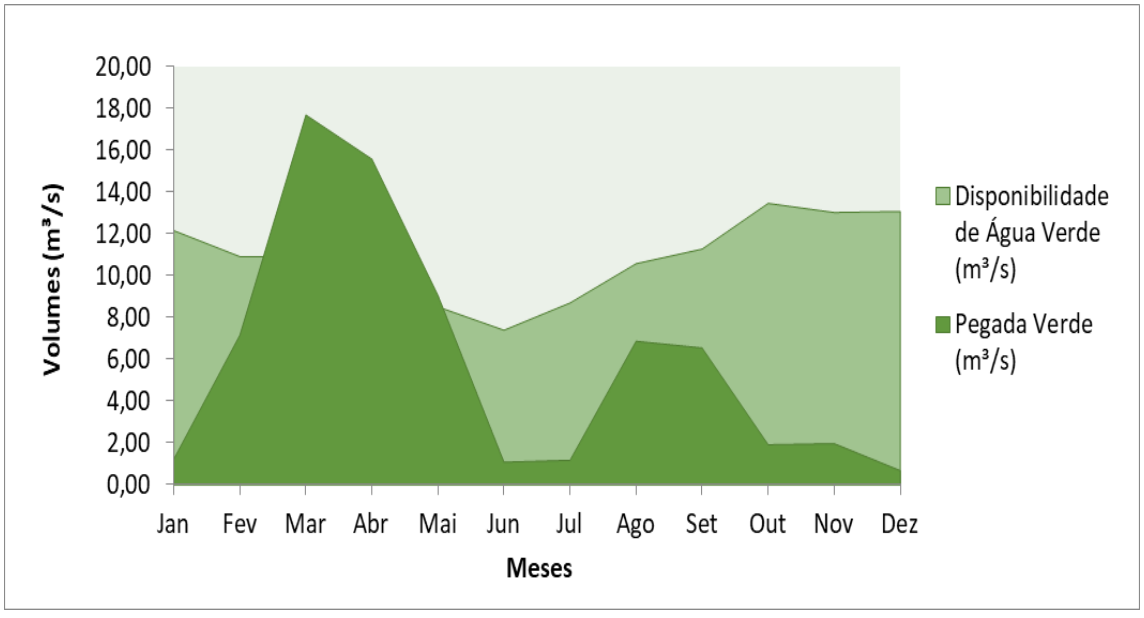


Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A análise evidenciou na Figura 3 que, entre os meses de setembro a novembro, ocorre um quadro de escassez de água nos municípios da sub-bacia estudada, expondo a população local a períodos críticos que demandam a adoção de estratégias voltadas à racionalização do uso dos recursos hídricos. Ainda que sejam utilizadas tecnologias como carros-pipa e sistemas sociais de captação e armazenamento de água, essas soluções se revelam, até o presente momento, insuficientes para suprir integralmente as demandas diárias da população atendida.

Embora se reconheçam limitações na pesquisa, especialmente relacionadas à análise detalhada da Pegada Hídrica Verde, optou-se por apresentar o indicador correspondente, a fim de oferecer uma visão mais abrangente do balanço hídrico no solo da sub-bacia estudada. Para tanto, considerou-se a evapotranspiração total da região, sendo que 30% desse volume e foi destinado à manutenção das áreas ambientais, sendo que 18% associado a superfícies impermeabilizadas, que não são apropriadas para agricultura irrigada. Com base nesses parâmetros, foi calculado o nível de disponibilidade de água verde, cujo resultado foi representado graficamente na Figura 4, possibilitando uma compreensão visual do comportamento dessa componente ao longo do período analisado.

Figura 4 - Análise da sustentabilidade ambiental considerando a Pegada Hídrica Verde.



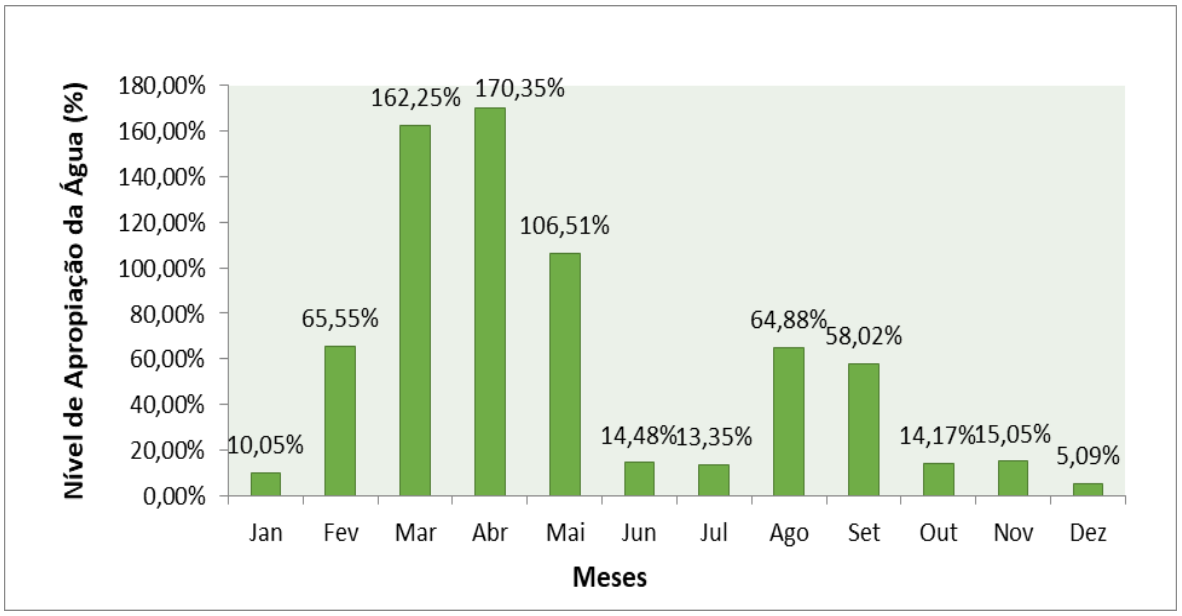
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

A partir da análise mensal na Figura 4, observou-se que a sub-bacia analisada apresenta condição de insustentabilidade nos meses de março e abril principalmente, período

em que o consumo hídrico atinge seu pico máximo. Este comportamento está associado, principalmente, às demandas elevadas decorrentes dos períodos de plantio, mesmo que por sua vez são influenciados por determinados fatores, tais como precipitação pluviométrica, ocorrência de ventos e variações de temperatura ao longo do ano.

Na Figura 5, são ilustrados os níveis de apropriação mensal da água verde, permitindo visualizar a flutuação do consumo ao longo do período analisado. Todavia, quando os dados são avaliados em escala anual, verifica-se que a sub-bacia apresenta um quadro de sustentabilidade, registrando um consumo equivalente a apenas 54,89% da água verde total disponível, o que indica relativa estabilidade no balanço hídrico no solo ao longo do ano de 2024.

Figura 5 - Análise do nível de Apropriação da Água na Sub-bacia do rio Miriri/PB.



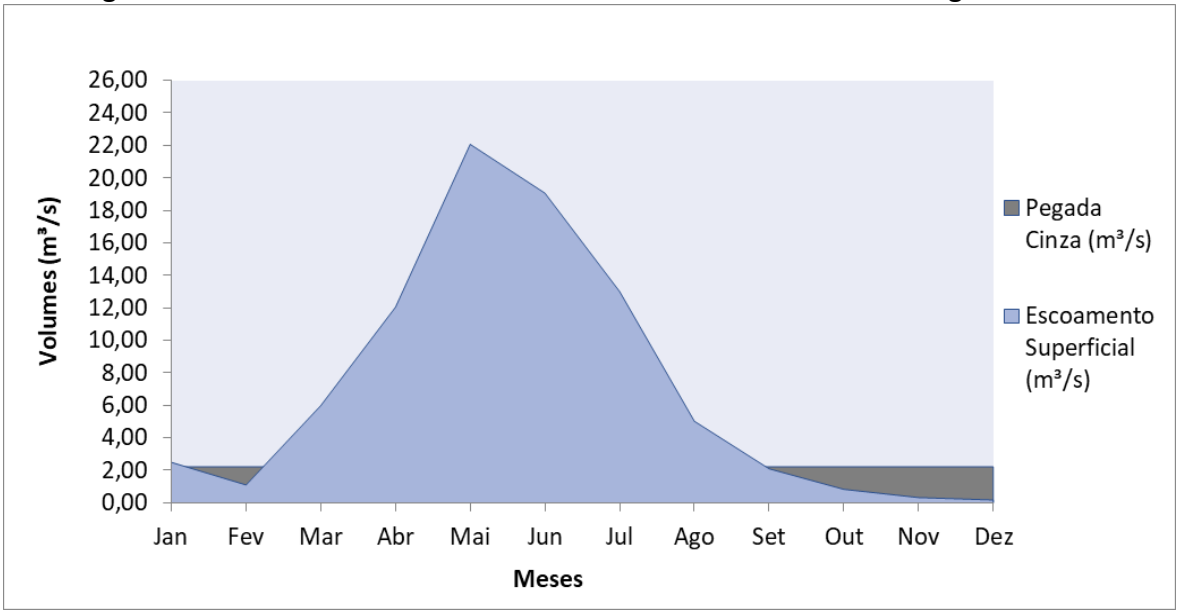
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Por fim, a pegada hídrica cinza na sub-bacia analisada foi quantificada, conforme apresentado na Figura 6. Embora os valores obtidos sejam relativamente elevados quando comparados com as pegadas azul e verde, os resultados demonstram que a região possui uma capacidade satisfatória de assimilação dos efluentes gerados entre os meses de março e setembro.

Neste contexto, verificou-se que o nível de poluição anual na sub-bacia do rio Miriri/PB permaneceu abaixo do ponto crítico ambiental, alcançando um percentual de 31,52%. Esse resultado indica que a sub-bacia demonstrou capacidade de assimilação suficiente para

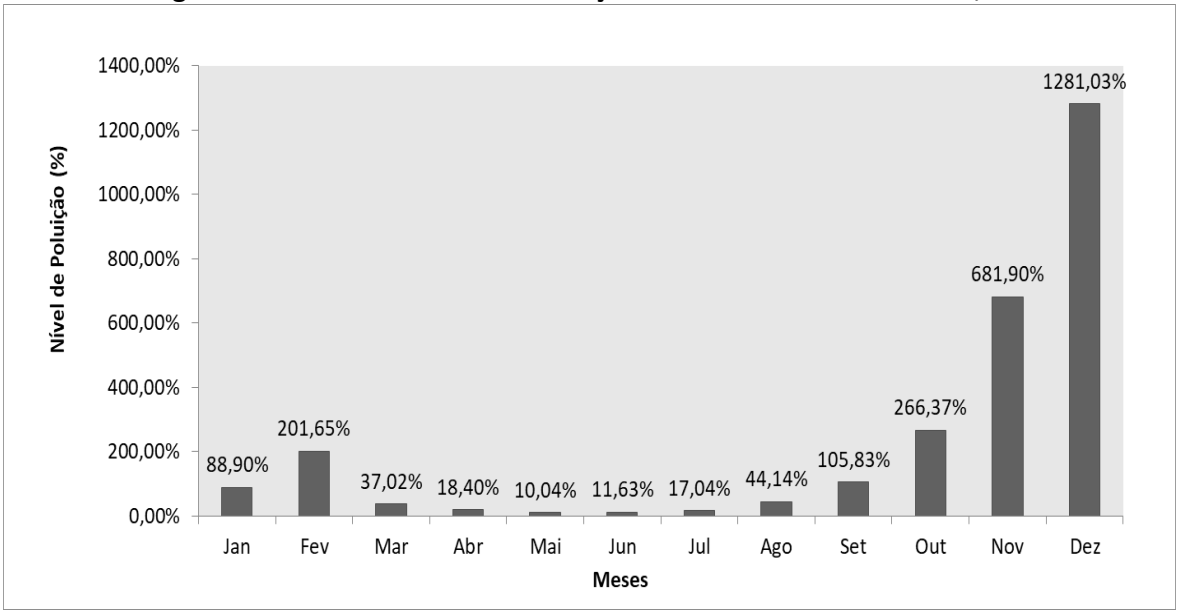
absorver integralmente a pegada hídrica cinza estimada, sendo, portanto, considerada sustentável ao longo do período analisado, conforme observado na Figura 7.

Figura 6 - Análise da sustentabilidade ambiental considerando a Pegada Hídrica Cinza.



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Figura 7 - Análise do nível de Poluição na Sub-bacia do rio Miriri/PB.



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que, embora a sub-bacia analisada seja de dimensão relativamente pequena, os setores avaliados — abastecimento, saneamento, irrigação e pecuária — apresentam pegadas significativas de água para o desenvolvimento de

suas atividades. Essa constatação reforça a necessidade urgente de implementação de práticas voltadas ao consumo consciente e eficiente, não apenas com o objetivo de otimizar os recursos hídricos disponíveis, mas também de reduzir o volume total consumido, mitigando os riscos associados à escassez.

No decorrer do estudo, ficou evidente a relevância da aplicação do conceito de pegada hídrica como ferramenta de análise em escala regional, pois esse indicador possibilita estimar o volume de consumo de cada setor, além de identificar padrões de uso da água na sub-bacia. Embora se trate de um conceito relativamente recente na literatura científica e que ainda apresenta lacunas metodológicas a serem aprofundados, os resultados desta pesquisa, mostraram a eficácia da metodologia adotada para avaliar a sustentabilidade ambiental da área investigada. Nesse sentido, o trabalho contribui para o aprimoramento do conhecimento sobre a gestão de recursos hídricos, que são essenciais ao desenvolvimento socioeconômico, mas que sofrem pressões crescentes devido às atividades antrópicas. Ressalta-se, portanto, a importância de medidas preventivas e integradas para assegurar a disponibilidade desse recurso vital às gerações futuras.

Diversas ações podem ser propostas para melhorar o panorama de sustentabilidade ambiental identificado, entre as quais se destacam: o aprimoramento do monitoramento das vazões reais dos cursos d'água; o incentivo ao cadastramento e atualização das outorgas de uso da água, possibilitando uma avaliação mais precisa da demanda; a formulação de políticas públicas voltadas à redução de desperdícios e controle da poluição hídrica; e a ampliação de sistemas de esgotamento sanitário capazes de remover eficientemente os poluentes e restituir a água ao meio ambiente dentro dos padrões estabelecidos pelos órgãos competentes.

Além disso, recomenda-se o fortalecimento e aprimoramento dos projetos de tecnologias sociais para captação e armazenamento de água, amplamente utilizados em áreas rurais, bem como a incorporação de indicadores de sustentabilidade nos instrumentos de gestão hídrica. Tais iniciativas têm potencial para promover a sustentabilidade ambiental de forma mais ampla e efetiva.

Os achados desta pesquisa podem subsidiar a formulação de estratégias voltadas à gestão mais eficiente dos recursos hídricos, além de contribuir para conscientizar a população, empresas e órgãos reguladores sobre os volumes consumidos e os impactos negativos decorrentes do uso inadequado da água. Com uma abordagem mais crítica e consciente,

torna-se possível reduzir danos aos ecossistemas aquáticos e evitar que os recursos hídricos se tornem ainda mais escassos.

Contudo, é importante salientar que, em virtude da ausência de dados disponíveis, o setor industrial não pôde ser incluído na presente análise. Espera-se que futuras investigações contemplem esse e outros setores, possibilitando análises mais abrangentes sob diferentes perspectivas temporais e espaciais. Desse modo, este estudo representa uma contribuição relevante e serve como base para perspectivas futuras e para a consolidação da pegada hídrica como instrumento de gestão, ao oferecer dados concretos que retratam de forma fidedigna a realidade local. Em última instância, tais resultados podem incentivar avanços na proteção ambiental, fomentar a adoção de práticas mais sustentáveis e responsáveis e contribuir para a melhoria da situação hídrica em escala regional e global.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos, a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) pelas bolsas de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Relatório de usos da água no Brasil. Brasília: ANA, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/usos-da-agua.

AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Paraíba. Plano Estadual de Recursos Hídricos: Relatório Executivo. João Pessoa: AESA, 2022. Disponível em: https://www.aesa.pb.gov.br/. Acesso em: 05 set. 2024.

ARTICULAÇÃO SEMIÁRIDO BRASILEIRO (ASA). Tecnologia Social: um novo padrão de desenvolvimento. Paraíba: ASA, 27 ago. 2024. Disponível em: https://asabrasil.org.br/2013/08/27/tecnologia-social-um-novo-padrao-de-desenvolvimento/.

ALBUQUERQUE, M. F.; Medições e Modelagem da Pegada Hídrica da Cana-De-Açúcar Cultivada no Brasil; Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG); Campina Grande-PB, 2013.

ALLAN, J. A.; Virtual water: A strategic resource global solutions to regional deficits. Ground Water, v.36, p.545-546. 1998.

BNDES; Criação da Pegada Hidrológica nas Empresas; Plano de Desenvolvimento Econômico e Social do Banco (2011).

CANDIDO, L. L. T.; ALVES, A. G. S.; A Regulamentação Da Pegada Hídrica Como Instrumento De Garantia do Desenvolvimento Sustentável e Os Seus Impactos na Ordem Econômica. Monografia apresentada ao Curso de Direito do Centro de Ciências Jurídicas e Sociais da Universidade Federal de Campina Grande 2018.

COSTA, D. P.; SANTOS, K. J. dos. Gestão de recursos hídricos apoiada por uso de SIG: o caso da bacia do Rio Miriri. In: Anais do III Conidis, Campina Grande: Realize Editora, 2017.

CIRNE, G. M. P.; VIEIRA, A. S.; Análise da estimativa da pegada hídrica total: um estudo de caso de uma indústria de sovertes localizada no sertão paraibano; Revista Brasileira de Gestão Ambiental; Vol.13 nº.02, p.25-35, abr./jun. 2019.

DRASTIG, K.; PROCHNOW, A.; KRAATZ, S.; KLAUSS, H.; PLOCHL, M.; Water footprint analysis for the assessment of milk production in Brandenburg (Germany). Advances Geosciense, v.27, p.65- 70. 2010.

EMPINOTTI, V. L.; JACOBI, P. R.; Novas práticas de governança da água? O uso da pegada hídrica e a transformação das relações entre o setor privado, organizações ambientais e agências internacionais de desenvolvimento; Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 27, p. 23-36, jan./jun. 2013.

FERREIRA, F. F.; Pegada Hídrica da Geração de Energia Hidrelétrica no Brasil – Um Estudo de Caso da AES Tietê S.A.; Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro-RJ, 2014.

HOEKSTRA, A. Y.; MEKONNEN, M. M.; CHAPAGAIN, A. K.; MATHEWS, R. E.; RICHTER, B. D.; Global Monthly Water Scarcity: Blue Water Footprints versus Blue Water Availability. PLoS ONE 7(2): e32688. doi:10.1371/journal.pone.0032688. Volume 7, Issue 2. 2012.

HOEKSTRA, A.Y; CHAPAGAIN, A.K.; The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. Ecological Economics, v.70, p 749-758, 2011.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALDAYA, M. M.; MEKONNEN; M. M.; Manual de Avaliação da Pegada Hídrica: estabelecendo o Padrão Global; Tradução para português. (2011).

KOELLNER, Thomas; BERGER, Markus; MURRAY, Ashley. Integration of water scarcity and pollution impacts in water footprint assessment: expanding the horizon. Journal of Industrial Ecology, v. 27, n. 3, p. 745-758, 2023.

LEÃO, R. S.; Pegada Hídrica: Visões e Reflexões Sobre sua Aplicação; Revista Ambiente & Sociedade n São Paulo v. XVI, n. 4 n p. 159-162 n out.-dez. 2013.

LIMA, A. J. R.; Governança dos recursos hídricos: proposta de indicador para acompanhar sua implementação.; São Paulo: WWF - Brasil: FGV, 2014.

LI, Pengfei; YANG, Jianyi; JIA, Mohammad A.; GAO, Shaolei; LIANG, Roch; SUN, Yanying; ZENG, Xiaorui; SUI, Dian; REN, Shaolei. Making AI Less "Thirsty": Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models. In: Proceedings of the 2023 ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '23). New York: ACM, p. 1–18. 2023.

MARACAJÁ, K. F. B.; ARAÚJO, L. E.; SILVA, V. P. R.; Regionalização da Pegada hídrica no Estado da Paraíba. Revista de Administração, Contabilidade e Sustentabilidade. Vol.4, nº 1, p. 105-122, 2014.

PALHARES, J. C. P., MORELLI, M., NOVELLI, T. I.; Water footprint of a tropical beef cattle production system: The impact of individual-animal and feed management; Advances in Water Resources 149, 103853; 2021, DOI: https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103853.

PROCHNOW, A.; DRASTIG, K.; KLAUSS, H.; BERG, W. Water use indicators at farm scale: methodology and case study. Food and Energy Security, v.1, p.29-46, 2012.

PAB – Programa Água Brasil; Pegada Hídrica de Bacias Hidrográficas; Inciativa da Agência nacional de Águas, Fundação Banco do Brasil e WWF-Brasil; publicado, 2014.

SILVA, V. P. R.; ALEIXO, D. O.; DANTAS NETO, J.; MARACAJÁ, K. F. B.; ARAÚJO, L. E.; Uma medida de sustentabilidade ambiental: Pegada hídrica. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.17, n.1, p.100–105, 2013.

SILVA, V. R.. Aquífero Barreiras e seus aspectos hidrogeológicos e hidroquímicos preliminares na bacia hidrográfica do rio Guajú RN/PB. 2022. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

VIEIRA, B.; JUNIOR, W. S.; Contribuições para Abordagem Municipal da Pegada Hídrica: Estudo de Caso no Litoral de São Paulo; Revista Ambiente & Sociedade n São Paulo v. XVIII, n. 3 n p. 231-252 n jul.-set. 2015.

VIEIRA, A. S.; MOREIRA, S. B. L. C.; SILVA, L. R. P.; FONTGALLAND, I. L.; Total Water Footprint An Analysis of the Level of Environmental Sustainability in the Taperoa River Sub basin Located in the State of Paraiba, Brazil; International Journal of Advances in Engineering and Managemen; Volume 4 , Issue 3, March 2022 , Page No : 640-652; DOI : 10.35629/5252-0403640652.

CAPÍTULO XII

DA LAMA AO CAOS, DO CAOS À SOLUÇÃO: TECNOLOGIA NO ENFRENTAMENTO DOS RESÍDUOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS

FROM MUD TO CHAOS, FROM CHAOS TO SOLUTION: TECHNOLOGY IN TACKLING WASTE IN AQUATIC ENVIRONMENTS

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-12

Joyce Alves de Oliveira [1]
Maria Cecília Athayde Amaral Baudel [2]
José Alexandre Mariano Oliveira [3]
Eliana Cristina Barreto Monteiro [4]
Ângelo Just da Costa e Silva [5]

[1] Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1384-1991.
[2] Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9569-6176.
[3] Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5088-712X.
[4] Profa. Pós-graduação, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP e Universidade de Pernambuco – UPE. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0842-779X.
[5] Prof. Pós-graduação, Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP e Universidade de Pernambuco – UPE. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0759-6439.

RESUMO

A contaminação dos ecossistemas aquáticos por resíduos sólidos, efluentes e contaminantes emergentes constitui um crítico desafio socioambiental. Este trabalho analisa a dinâmica, as vias de transporte e os impactos dos contaminantes nos corpos hídricos, bem como as tecnologias de remoção, soluções biotecnológicas e a transição para a economia circular. A revisão evidencia que o descarte inadequado de plásticos, metais pesados, hidrocarbonetos e compostos farmacêuticos, intensificado pelo crescimento populacional e pela urbanização costeira, promove a degradação de habitats, bioacumulação na teia alimentar, eutrofização e comprometimento de serviços ecossistêmicos. A trajetória dos poluentes estende-se de fontes continentais pontuais e difusas até bacias hidrográficas e zonas marinhas, impulsionada pelo escoamento superficial e transporte fluvial. Para conter e mitigar esses danos, destacam-se barreiras físicas e coletores automatizados, associados a técnicas biotecnológicas como biorremediação por microalgas e fungos, biossorção, biossurfactantes, fitorremediação e wetlands construídos. Adicionalmente, a revalorização de resíduos possibilita sua reinserção em cadeias produtivas cíclicas. Conclui-se que o enfrentamento da poluição hídrica requer a integração entre soluções tecnológicas, gestão adequada de resíduos e medidas preventivas, priorizando a não geração e a redução na fonte, aliadas a políticas públicas, fiscalização e mudanças nos padrões de produção e consumo.

Palavras-chave: Contaminantes. Biorremediação. Soluções. Economia circular.

ABSTRACT

Contamination of aquatic ecosystems by solid waste, effluents, and emerging contaminants constitutes a critical socio-environmental challenge. This study analyzes the dynamics, transport pathways, and impacts of contaminants in water bodies, as well as removal technologies, biotechnological solutions, and the transition toward a circular economy. The review shows that the improper disposal of plastics, heavy metals,

hydrocarbons, and pharmaceutical compounds, intensified by population growth and coastal urbanization, promotes habitat degradation, bioaccumulation in food webs, eutrophication, and the impairment of ecosystem services. The trajectory of pollutants extends from point and diffuse continental sources to river basins and marine areas, driven by surface runoff and fluvial transport. To contain and mitigate these impacts, physical barriers and automated collectors stand out, combined with biotechnological techniques such as bioremediation using microalgae and fungi, biosorption, biosurfactants, phytoremediation, and constructed wetlands. Additionally, waste valorization enables its reintegration into circular production chains. It is concluded that addressing water pollution requires the integration of technological solutions, appropriate waste management, and preventive measures, prioritizing waste prevention and reduction at the source, together with public policies, enforcement, and changes in production and consumption patterns.

Keywords: Contaminants. Bioremediation. Solutions. Circular economy.

1. INTRODUÇÃO

O descarte indevido de resíduos é uma problemática crescente que vem preocupando órgãos de preservação ambiental de forma assídua, resultando em um paradoxo em que o cuidado com a natureza vem sendo negligenciado e retrocede conforme a humanidade e suas tecnologias evoluem. O aumento populacional e o consumismo exacerbado provenientes da evolução de diversos setores industriais resultam no aumento exponencial de materiais descartados no meio ambiente sendo, em sua maioria, realizado de forma inadequada e prejudicial.

A geração de resíduos gera impactos relacionados a degradação ambiental e esfera econômica. Conforme abordado no relatório Global Waste Management Outlook 2024 publicado pelo United Nations Environment Programme (UNEP), há uma estimativa de crescimento de 73% no nível de resíduos sólidos, saindo de 2,1 bilhões de toneladas em 2023 para 3,8 bilhões de toneladas em 2050, além do aumento do custo global de gerenciamento de resíduos estimado de US$ 361 bilhões em 2020 para US$ 640,3 bilhões até 2050, incluindo os custos ocultos de poluição, saúde precária e mudanças climáticas.

Anualmente, 2 bilhões de toneladas métricas de resíduos municipais é gerado, onde 23% dos resíduos não são coletados e 33% são descartados abertamente, principalmente em países de baixa renda em que 93% dos resíduos são enterrados ou jogados em cursos d'água (World Bank Group, 2025).

Conforme o censo de 2022 publicado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), cerca de 54% da população brasileira reside em região litorânea, compreendendo cerca de 150km desde o litoral até o continente. Essa proximidade geográfica faz com que haja uma via de mão dupla com relação a população e seus impactos socioambientais.

Enquanto há um impacto social pela degradação desse ambiente aquático, afetando a qualidade de vida e bem-estar das comunidades litorâneas e fauna local, em contrapartida existe uma facilitação do transporte destes resíduos, seja pelo descarte direto em ambientes marinhos ou indireto ocasionado pela disposição em vias públicas, que posteriormente são transportados através das redes de drenagem urbana e das bacias hidrográficas.

Estudos apontam que a contaminação marinha é apenas a ponta de uma longa cadeia de poluição e impactos a ambientes aquáticos. A crescente atividade industrial e urbanização em áreas costeiras e de manguezais compactuou para o aumento da contaminação por lixo antrópico e seu aumentou nas últimas décadas. Embora não haja uma quantificação total da área afetada pelo descarte de resíduos, estudos realizados em manguezais do Sistema Estuarino Santos–São Vicente (SESS) identificou 22,84 itens/m² de resíduo descartado, colocando o SESS entre os quatro ecossistemas de manguezais mais contaminados do mundo (Cavalcante *et al.*, 2024). Também foram identificados 0,89 ± 0,11 kg/m² e 0,10 ± 0,02 kg/m^2 respectivamente de macrolixo em ambientes de manguezais e praia na Península de Ajuruteua, Pará, Amazônia brasileira, uma área designada como Área de Proteção Ambiental (APA) (Mendes *et al.*, 2025). Além disso, é estimado que 1,15 e 2,41 milhões de toneladas de resíduos plásticos são direcionados ao oceano todos os anos vindos dos rios (Lebreton *et al.*, 2017).

A presença de detritos em ambientes aquáticos constitui uma problemática ambiental que necessita de estratégias de mitigação imediatas, visto que diversas espécies são afetadas negativamente pelo depósito. Um estudo realizado por Kühn e van Franeker (2020) buscou quantificar a interação plástica na biota marinha e identificou que detritos marinhos afetaram 914 espécies de aves marinhas, mamíferos, tartarugas, peixes e espécies de invertebrados por meio de emaranhamento e/ou ingestão, resultando em lesões, comprometimento das funções fisiológicas e, em casos graves, mortalidade, causando um desequilíbrio nos ecossistemas e contribuir para alterações nas relações ecológica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. RESÍDUOS: CONCEITO E CLASSIFICAÇÃO

A definição acadêmica e legal de resíduo (ou resíduo sólido) fundamenta-se na origem do material, no seu estado físico e na intenção ou obrigação jurídica de seu descarte. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da Norma Brasileira

Regulamentadora (NBR) 10004-1:2024 e a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei Federal nº 12.305/2010, definem resíduo sólido como:

> material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (Art. 3º, inciso XVI, 2010).

Dentro de diferentes áreas como as Ciências Biológicas, Engenharias e outras, surgem termos como resíduos, dejetos, rejeitos e efluentes. Assim, a fim de esclarecimento e distinção, os termos supracitados definem-se assim:

Resíduo: Descrito conforme ABNT (2024) e Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010) anteriormente. Exemplo: Vidro, Metal, Óleo de cozinha usado; **Rejeito:** É uma categoria específica de resíduo sólido para a qual foram esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis. Por não apresentar alternativa de reaproveitamento, a única solução prevista é a sua disposição final ambientalmente adequada, como a alocação em aterros sanitários (Brasil, 2011). Exemplo: Material contaminado sem possibilidade de reaproveitamento; **Dejeto:** A definição varia conforme o contexto de aplicação, podendo ter definição médica – resíduos orgânicos e efluentes celulares/digestivos expelidos pelo organismo – e ambiental – empregado para designar as fezes e urinas produzidas por animais, contendo elevada quantidade de matéria orgânica e nutrientes (Albuquerque *et al*., 2020; Ejiugwo *et al*., 2025; Ferreira, 2022). Exemplo: Fezes, Urina e demais excretas fisiológicas; **Efluente:** O termo efluente caracteriza qualquer despejo líquido proveniente de diversas atividades ou processos, sejam eles de origem industrial, comercial ou de serviços. Suas características dependem diretamente da matéria-prima utilizada, do tipo de indústria e da tecnologia empregada, podendo vir acompanhados de águas pluviais contaminadas e esgotos sanitários (Brasil, 2011; Cavalcanti, 2016). Exemplo: Esgoto doméstico, Industrial, Estação de tratamento.

2.2. RESÍDUOS E CONTAMINANTES NOS AMBIENTES AQUÁTICOS

A contaminação dos recursos hídricos por resíduos sólidos e contaminantes emergentes constitui um importante desafio ambiental (Akbar *et al*., 2026). Entre os materiais de maior relevância estão os polímeros sintéticos, que abrangem macroplásticos, microplásticos e nanoplásticos. A produção mundial de polímeros aumentou intensamente desde 1950, e a elevada participação de produtos de uso único contribui para o descarte inadequado. No ambiente, os plásticos podem sofrer fragmentação e atuar como superfícies de adsorção de outros contaminantes (Talukdar *et al*., 2024; Liu *et al*., 2026; Râpă *et al*., 2023).

Resíduos de pesca, como redes, linhas e armadilhas abandonadas, perdidas ou descartadas, também constituem fontes de impacto, podendo provocar pesca fantasma, aprisionamento de organismos e degradação mecânica de habitats (Castelo *et al*., 2020; Landrigan *et al*., 2020).

Entre os contaminantes inorgânicos, destacam-se Pb, Cd, Hg, Cr, Ni, Zn, As e Al, que podem alcançar os ambientes aquáticos por efluentes industriais, drenagem de mineração e lixiviados. Por sua persistência, alguns desses elementos podem ser bioacumulados e biomagnificados, estando associados a estresse oxidativo, alterações enzimáticas, lesões celulares e efeitos ecotoxicológicos (Oloye *et al*., 2026; Ray; Vashishth, 2026; Oros, 2025; Aziz *et al*., 2023). O lançamento de esgotos, efluentes agroindustriais e dejetos pode elevar a DBO e a DQO, reduzindo o oxigênio dissolvido e favorecendo condições de anoxia. O excesso de nitrogênio e fósforo intensifica a eutrofização, enquanto hidrocarbonetos derivados de petróleo podem formar fases oleosas e introduzir compostos persistentes no ambiente (Barbosa, 2021; Cavalcanti, 2016; Southgate, 2015).

Também merecem atenção contaminantes emergentes, como fármacos (Figura 01), agrotóxicos, surfactantes e desreguladores endócrinos, além de microrganismos patogênicos e poluentes orgânicos persistentes. Esses compostos podem resistir a tratamentos convencionais e interferir em processos fisiológicos e ecológicos (Morin-Crini *et al*., 2022; Rodrigues-Silva *et al*., 2014).

Figura 01: Blister de fármaco. Pontal do Peba – AL.

Fonte: Autoria própria, 2024.

2.3. COMO OS CONTAMINANTES CHEGAM AOS CORPOS D'ÁGUA?

A entrada de contaminantes nos ecossistemas aquáticos ocorre por meio de vias diretas e indiretas que conectam as atividades humanas continentais aos ecossistemas de água doce e marinhos (Landrigan *et al*., 2020). Desse modo, a Rota Poluidora, assim denominada pelos autores, ocorre da seguinte maneira, segundo o estudo de Southgate (2015):

1. **Descarte e Lançamento na Fonte (Origem Pontual e Difusa)**

Esgotos, efluentes industriais e resíduos podem alcançar diretamente os cursos d'água (Figura 02 e 03), enquanto atividades agropecuárias constituem fontes difusas de matéria orgânica, nutrientes, sedimentos e compostos químicos (Brasil, 2011).

Figura 02: Efluentes urbanos. Ponta Verde – AL.

Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 03: Efluentes e rejeitos. Pontal do Peba – AL.

Fonte: Autoria própria, 2024.

2. **Mobilização por Drenagem, Escoamento e Lixiviação**

chuvas e escoamento superficial transportam partículas, óleos, microfibras, agrotóxicos e sedimentos para as redes de drenagem e cursos fluviais. A infiltração em aterros e solos contaminados pode mobilizar constituintes solúveis e metais até aquíferos e águas superficiais.

3. **Transporte Fluvial e Retenção nos Sedimentos**

   contaminantes são conduzidos pelas bacias hidrográficas e parte da carga pode ser depositada nos sedimentos. Esses depósitos funcionam como reservatórios de longo prazo, mas podem voltar à coluna d'água por ressuspensão associada a alterações hidrodinâmicas, bioturbação ou tempestades.

4. **Transição Estuarina e Chegada ao Ambiente Costeiro e Marinho**

   os contaminantes remanescentes alcançam zonas estuarinas e costeiras e passam a ser redistribuídos por correntes, ondas e ventos, favorecendo o acúmulo em praias, estuários, ambientes bentônicos e zonas de convergência oceânica.

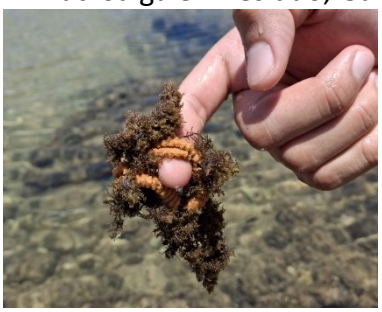
2.4. IMPACTOS NOS AMBIENTES AQUÁTICOS

A introdução de resíduos e efluentes provoca alterações físicas, químicas e biológicas que comprometem habitats e serviços ecossistêmicos.

Impactos Físicos:

Decorrem principalmente do acúmulo de resíduos sólidos, polímeros sintéticos e petrechos de pesca abandonados, perdidos ou descartados (Figura 04). Esses materiais podem cobrir superfícies bentônicas, modificar condições do substrato e degradar habitats, especialmente em ambientes recifais e costeiros (Nguyen *et al*., 2026; Royer *et al*., 2023; Ma *et al*., 2020). Redes, linhas e armadilhas também podem provocar emaranhamento e aprisionamento de organismos, caracterizando a chamada pesca fantasma (Royer *et al*., 2023).

Figura 04: Macroalga em resíduo, Gaibu – PE.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Impactos Químicos:

efluentes podem elevar concentrações de metais, hidrocarbonetos e nutrientes. A bioacumulação e a biomagnificação de determinados metais ampliam a exposição ao longo das cadeias alimentares. Esgotos e efluentes também elevam DBO e DQO, reduzem o oxigênio dissolvido e podem favorecer anoxia; o excesso de nitrogênio e fósforo intensifica a eutrofização (Figura 05) (Oloye *et al.,* 2026; Oros, 2025; Barbosa, 2021; Cavalcanti, 2016; Dias *et al*., 2019). Fármacos, agrotóxicos e desreguladores endócrinos podem persistir e interferir em processos fisiológicos e ecológicos (Morin-Crini *et al*., 2022; Rodrigues-Silva *et al*., 2014).

Figura 05: Eutrofização em efluente, Ponta Verde – AL.

Fonte: Autoria própria, 2026.

Impactos Biológicos:

os contaminantes podem provocar estresse oxidativo, alterações enzimáticas, danos teciduais, alterações reprodutivas e redução da biodiversidade aquática (Ayilara; Babalola, 2023). A bioacumulação e a biomagnificação ampliam a exposição de organismos situados em diferentes níveis tróficos (Oros, 2025). Resíduos plásticos também podem servir como substratos para comunidades microbianas, formando a plastisfera e contribuindo para a dispersão de microrganismos e genes de resistência antimicrobiana (Yadav *et al*., 2025; Râpă *et al*., 2023). Esses impactos repercutem sobre os serviços ecossistêmicos, afetando o abastecimento de água, a pesca, o turismo e a proteção costeira proporcionada por ecossistemas como manguezais e pradarias de macrófitas (Kumar, 2026; Oros, 2025; Choudhary *et al*., 2025; Ma *et al*., 2020).

Impactos nos Serviços Ecossistêmicos:

Todas as perturbações supracitadas refletem diretamente na degradação dos serviços ecossistêmicos essenciais ao bem-estar humano, uma vez que:

1. **Abastecimento público:** Há comprometimento neste serviço devido à contaminação de mananciais superficiais e aquíferos subterrâneos por lixiviados de aterros, metais pesados e poluentes emergentes (Kumar, 2026; Pernebayev; Aitimbetova, 2026; Xie *et al*., 2023; Landrigan *et al*., 2020);
2. **Pesca comercial e artesanal:** A atividade é gravemente prejudicada pela diminuição dos estoques pesqueiros, pela destruição dos estuários que funcionam como berçários naturais e pela contaminação de pescados por toxinas algais, metais e microplásticos, gerando perdas econômicas para o setor e riscos sanitários aos consumidores (Oros, 2025; Landrigan *et al*., 2020);
3. **Turismo:** O turismo e a recreação sofrem retração diante da poluição estético-visual por resíduos plásticos, do risco de infecções microbiológicas e da proliferação de marés vermelhas, fatores que reduzem a atratividade das zonas costeiras (Oros, 2025; Landrigan *et al*., 2020);
4. **Ecossistema:** A destruição física e o comprometimento fisiológico de ecossistemas estruturantes — como manguezais e pradarias de macrófitas marinhas — degradam a função natural de proteção costeira, reduzindo a contenção de sedimentos e aumentando a vulnerabilidade das comunidades litorâneas contra processos erosivos e tempestades (Choudhary *et al*., 2025; Ma *et al*., 2020).

2.5. TECNOLOGIAS E SOLUÇÕES BIOTECNOLÓGICAS PARA PREVENÇÃO E REMOÇÃO DE RESÍDUOS

A preservação da qualidade da água depende do monitoramento sistemático dos corpos hídricos, permitindo identificar alterações e agentes potencialmente perigosos e orientar medidas de conservação (Brito *et al*., 2020). Nesse contexto, parâmetros de qualidade devem ser avaliados considerando as características de cada corpo hídrico e os padrões estabelecidos pela legislação ambiental (Brasil, 2005).

Na prevenção da chegada de resíduos aos ambientes costeiros e marinhos, destacam-se barreiras de contenção, sistemas de interceptação e coletores automatizados. Telas, redes, biobarreiras e sistemas flutuantes podem reter macrolixo transportado pela drenagem e pelos rios, enquanto embarcações coletoras, rodas d'água e sistemas automatizados auxiliam na remoção e triagem dos materiais (G20, 2021).

Quando os contaminantes atingem escalas microscópicas ou moleculares, podem ser empregadas estratégias de biorremediação, utilizando organismos ou seus componentes para degradar, transformar ou imobilizar poluentes. Microalgas, como Chlorella spp. e Scenedesmus spp., podem contribuir para a remoção de nutrientes e determinados contaminantes presentes em efluentes, enquanto fungos basidiomicetos apresentam potencial para a degradação de compostos orgânicos e corantes (Dias *et al*., 2019; Santos, 2016).

Outras estratégias incluem a biossorção, na qual biomassa ativa ou inativa retém contaminantes por interações físico-químicas, e o emprego de biossurfactantes, capazes de atuar sobre contaminantes hidrofóbicos (Dias *et al*., 2019). Também se destacam a fitorremediação e os wetlands construídos, que combinam processos físicos, químicos e biológicos para remover ou imobilizar contaminantes e nutrientes presentes na água (Khan *et al*., 2026). Assim, a combinação entre monitoramento, tecnologias de contenção e processos biotecnológicos permite atuar em diferentes etapas da contaminação, desde a prevenção da entrada de resíduos até a recuperação de ambientes já degradados.

2.6. DO TRATAMENTO À ECONOMIA CIRCULAR

A mitigação da poluição aquática não deve se limitar à remoção dos resíduos já presentes no ambiente. A gestão deve priorizar a prevenção, a redução da geração e o reaproveitamento dos materiais, aproximando-se dos princípios da economia circular. Após a remoção de resíduos de ambientes aquáticos, os materiais devem ser direcionados, sempre que tecnicamente viável, para processos de triagem, reutilização e reciclagem, mantendo a disposição em aterros como alternativa para os rejeitos sem possibilidade de recuperação. No caso dos plásticos, destacam-se processos de reciclagem mecânica e química e, em determinadas situações, recuperação energética (Madricardo *et al*., 2020).

Sistemas de gestão de resíduos marinhos podem integrar coleta, triagem, reciclagem e recuperação de materiais, reduzindo a necessidade de matérias-primas virgens e os impactos associados ao descarte (Mankaa; Traverso, 2023). Além dos plásticos, resíduos de pesca, vidro, têxteis, metais e borracha podem apresentar potencial de valorização por processos como hidrólise enzimática, digestão anaeróbica e fermentação, possibilitando sua reinserção em cadeias produtivas (Ijaz *et al*., 2026; Santos; Mendes, 2025). Dessa forma, a economia circular amplia a abordagem do problema: em vez de considerar o resíduo apenas

como material a ser descartado, busca-se recuperar seu valor e reduzir a geração de novos resíduos.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A contaminação dos corpos d'água por resíduos, efluentes e contaminantes resulta de diferentes fontes e vias de transporte, provocando impactos físicos, químicos e biológicos e comprometendo os serviços ecossistêmicos. Nesse contexto, tecnologias de monitoramento, contenção, remoção e biorremediação apresentam potencial para reduzir a carga de contaminantes e contribuir para a recuperação de ambientes degradados. Entretanto, o enfrentamento do problema exige também medidas preventivas, como redução da geração de resíduos, gestão adequada, reutilização e valorização de materiais. Assim, a integração entre tecnologia, gestão ambiental e economia circular constitui uma estratégia para reduzir a entrada de resíduos nos ambientes aquáticos e favorecer sua conservação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas concedidas a José Oliveira (Processo nº 88887.289847/2026-00), Joyce de Oliveira (Processo nº 88887.289855/2026-00) e Maria Baudel (Processo nº 88887.329632/2026-00) e à Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), pelo apoio institucional.

REFERÊNCIAS

AKBAR, M. *et al.* Environmental monitoring and risk assessment of microplastics in aquatic ecosystems. **Environmental Pollution**, v. 340, p. 122800, 2026.

ALBUQUERQUE, A. F. *et al.* Ocorrência e destino de contaminantes emergentes em ecossistemas aquáticos. **Química Nova**, v. 43, n. 6, p. 750-762, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 10004-1**: Resíduos sólidos — Classificação Parte 1: Requisitos de classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024. 29 p.

AYILARA, O. M.; BABALOLA, O. O. Bioremediation of environmental wastes: the role of microorganisms. **Frontiers in Agronomy**, v. 5, p. 1183691, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/fagro.2023.1183691.

AZIZ, M. A. *et al.* Mitigation of pesticide runoff in paddy agroecosystems through endophytic bacteria: a pathway toward aquatic biodiversity restoration. **Journal of Biochemistry and Pharmacy**, v. 8, n. 2, p. 45-58, 2023.

BARBOSA, F. T. **Biorremediação de efluentes por microalgas**: uma análise matemática-estatística. 2021. 112 f. Tese (Doutorado em Biometria) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Botucatu, 2021.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 92, p. 89-91, 16 maio 2011.

BRASIL**.** Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 147, n. 147, p. 3-7, 3 ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução n° 357, de 17 de março de 2005**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasilia, DF, n. 53, p. 58-63, 18 mar. 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450 . Acesso em: 19 set. 2026.

BRITO, F.S.L. et al. **Comportamento das variáveis físico-químicas da água do lago Bolonha-Belém-PA.** Brazilian Journal of Development, v.6, n. 1, p. 1738-1753, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n1-120.

CASTELO, M. *et al.* Impactos do acúmulo de resíduos plásticos em ecossistemas estuarinos e costeiros. **Ocean and Coastal Management**, v. 195, p. 105280, 2020.

CAVALCANTE, E. dos R. *et al*. **High levels of anthropogenic litter trapped in a mangrove area under the influence of different uses**. Marine Pollution Bulletin, [S. l.], v. 200, p. 116045, mar. 2024. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116045.

CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de tratamento de efluentes industriais**. 3. ed. ampl. São Paulo: Engenho Editora Técnica, 2016. 496 p. ISBN 978-85-88006-05-8.

CHOUDHARY, S. *et al.* Advanced bioremediation strategies for recalcitrant organic pollutants in wastewater: a review. **Environmental Technology & Innovation**, v. 37, p. 103850, 2025.

DIAS, G. *et al.* Biorremediação de efluentes por meio da aplicação de microalgas – uma revisão. **Química Nova**, São Paulo, v. 42, n. 8, p. 891-899, 2019. DOI: https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170393.

EJIUGWO, C. *et al.* Assessment of microplastic contamination and chemical additives in aquatic environments. **Marine Pollution Bulletin**, v. 210, p. 117200, 2025.

FERREIRA, M. A. **Biogás como energia renovável a partir do aproveitamento de resíduos e dejetos na agropecuária**. 2022. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronegócios) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

G20**. G20 report on actions against marine plastic litter**: Osaka Blue Ocean Vision. Tóquio: Ministry of the Environment of Japan / G20, 2021. Disponível em: https://g20mpl.org/wp-content/uploads/2021/07/G20MPL-report-2021_final-edition1119.pdf. Acesso em: 20 set. 2026.

IJAZ, Haider et al. **Global policies and regulations in aquatic waste valorization: standards, challenges, and opportunities. In: *Aquatic Waste Valorization: Innovative Approaches and Sustainable Strategies*.** [S. l.]: Academic Press, 2026. p. 443-463. DOI: 10.1016/B978-0-443-44027-4.00017-2.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/. Acesso em: 16 set. 2026.

KHAN, F. *et al.* Emerging contaminants and microplastics removal mechanisms in bio-engineered wastewater treatment systems. **Journal of Hazardous Materials**, v. 502, p. 138100, 2026.

KUMAR, A. Nature-based solutions and phytoremediation techniques for aquatic restoration. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 33, p. 14200-14215, 2026.

LANDRIGAN, P. J. *et al.* Pollution and children's health: a review of the global burden of disease and environmental health policies. **The Lancet Planetary Health**, v. 4, n. 12, p. e610-e619, 2020.

LIU, Mengfei *et al.* Application of ceramic membranes for the removal of micro- and nanoplastics from water and wastewater: a review. **Emerging Contaminants and Environmental Health**, v. 2, art. 4, p. 1-18, 2026. DOI: https://doi.org/10.20517/eceh.2026.03.

MA, L. *et al.* Occurrence, fate, and ecological risks of microplastics in aquatic environments: a comprehensive review. **Environmental Pollution**, v. 266, p. 115100, 2020.

MADRICARDO, **Fantina et al. How to deal with seafloor marine litter: an overview of the state-of-the-art and future perspectives**. *Frontiers in Marine Science*, v. 7, art. 505134, 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fmars.2020.505134

MANKAA, Rose Nangah; TRAVERSO, Marzia. **Regional management options for floating marine litter in coastal waters from a life cycle assessment perspective.** The International Journal of Life Cycle Assessment, [S. l.], v. 28, n. 12, p. 1705-1722, out. 2023. DOI: 10.1007/s11367-023-02236-z.

MENDES, D. S. *et al*. **Macrolitter pollution in beaches and mangroves on the Brazilian Amazon coast**. Marine Pollution Bulletin, [S. l.], v. 215, p. 117891, abr. 2025. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2025.117891

MORIN-CRINI, Nadia *et al.* Worldwide cases of water pollution by emerging contaminants: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 20, n. 4, p. 2311-2338, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s10311-022-01447-4.

NGUYEN, N. V. *et al.* Abandoned, lost or otherwise discarded fishing gear (ALDFG): quantifications, polymer compositions, and impacts on aquatic ecosystems. **Conservation**, v. 6, n. 1, p. 67-85, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/conservation6010007.

OLOYE, D. A. *et al.* Ecotoxicological evaluation of freshwater bioindicators in contaminated aquatic ecosystems. **International Journal of Innovative Environmental Studies Research**, v. 14, n. 3, p. 99-117, 2026.

OROS, C. Bioaccumulation and bio-monitoring of heavy metals in estuarine ecosystems. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 44, n. 3, p. 310-322, 2025.

PERNEBAYEV, Z.; AITIMBETOVA, A**.** Environmental impacts of municipal solid waste disposal in urban areas: a systematic review of contamination pathways, assessment methods, and mitigation strategies. **Sustainability**, v. 18, n. 8, art. 3900, p. 1-24, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/su18083900.

RÂPĂ, M. *et al.* Insights into anthropogenic micro- and nanoplastic accumulation in drinking water sources and their potential effects on human health. **Polymers**, v. 15, n. 11, art. 2425, p. 1-28, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/polym15112425.

RAY, S.; VASHISHTH, A. Nanotechnology applications in microplastic and heavy metal remediation: recent trends and future prospects. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 14, p. 111500, 2026.

RODRIGUES-SILVA, C. *et al.* Ocorrência e degradação de quinolonas por processos oxidativos avançados. **Química Nova**, São Paulo, v. 37, n. 5, p. 868-885, 2014. DOI: https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140139.

ROYER, S. J. *et al.* An assessment of derelict fishing gear accumulation, impacts, and ghost fishing in marine protected areas. **Marine Pollution Bulletin**, v. 194, art. 115202, p. 1-12, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115202.

SANTOS, G. O. F. **Avaliação do tratamento de efluentes do banho de tingimento de indústria têxtil por fungos basidiomicetos em biorreatores**. 2016. 174 f. Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SANTOS, G. R.; MENDES, A. T. **Resíduos sólidos, reciclagem e economia circular:** desafios às políticas públicas. Rio de Janeiro: Ipea, abr. 2025. 45 p. DOI: https://doi.org/10.38116/td3112-port.

SOUTHGATE, E. F. **Avaliação da técnica de lavagem de solo associada à biorremediação para tratamento de um solo contaminado com metais pesados e hidrocarbonetos de petróleo**. 2015. 97 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

TALUKDAR, B. *et al.* Ecological risk assessment of persistent organic pollutants and heavy metals in riverine systems. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, n. 4, p. 320, 2024.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Global waste management outlook 2024**: beyond an age of waste – turning rubbish into a resource. Nairóbi: UNEP, 2024. Disponível em: https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024. Acesso em: 16 set. 2026.

WORLD BANK GROUP. **Clean cities, bright futures**: accelerating investment and reforms in solid waste management in developing countries. Washington, DC: World Bank Group, 2025. Disponível em: https://www.worldbank.org/en/results/2025/04/30/clean-cities-bright-futures-accelerating-investment-and-reforms-in-solid-waste-management-in-developing-countries. Acesso em: 16 set. 2026.

XIE, Y. *et al.* Ecotoxicological impacts and degradation pathways of emerging pharmaceutical contaminants in aquatic systems. **Science of The Total Environment**, v. 870, p. 161800, 2023.

YADAV, R. *et al.* Bioremediation of industrial effluents containing heavy metals and dyes using microbial consortia: mechanisms and applications. **Journal of Environmental Management**, v. 375, p. 124100, 2025.

CAPÍTULO XIII

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO SUSTENTÁVEL DE PEQUENAS PROPRIEDADES RURAIS NO SEMIÁRIDO NORDESTINO

OPTIMIZATION MODEL FOR SUSTAINABLE PLANNING OF SMALL RURAL PROPERTIES IN THE NORTHEASTERN SEMIARID REGION

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-13

Maria Eduarda Anacleto de Melo [1]
Allan Sarmento Vieira [2]
Ana Beatriz de Andrade [3]
Francisco Lopes de Souza Neto [4]
Ian Lucas Arruda da Silva [5]

[1] Graduanda do curso de Administração. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
[2] Professor Doutor em Recursos Naturais e Graduando em Direito. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
[3] Graduanda do curso de Administração. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
[4] Graduando do Curso de Direito. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
[5] Graduando do Curso de Ciências Contábeis. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

RESUMO

Para enfrentar o desafio da escassez hídrica no sertão paraibano, é de suma importância aprimorar técnicas matemáticas de otimização que promovam o uso eficiente da água em perímetros irrigados de pequenas propriedades rurais. Assim, o principal objetivo desta pesquisa é propor um modelo matemático de otimização que possibilite implementação de um planejamento agrícola sustentável, determinando as suas respectivas áreas ótimas a ser cultivada por cultura, considerando a rentabilidade, a geração de emprego e uso mínimo de defensivos agrícolas. Destaca-se ainda, a incorporação de um calendário agrícola com culturas diversificadas, adaptáveis, com baixo consumo hídrico e o uso de sistemas de irrigação eficientes. Em seguida foram definidas uma função objetivo sustentável com níveis de prioridades e restrições da área máxima irrigável, do volume de água disponível e a da rotatividade por cultura. A validação do modelo matemático proposto ocorreu com os dados disponíveis dos lotes familiares do Perímetro Irrigado de São Gonçalo, localizado na cidade de Sousa/PB que permitiu a constituição do cenário de operação planejado. Contudo, o modelo desenvolvido determinou uma seleção de culturas ranqueadas, mais rentáveis, que geram mais oportunidades de trabalho e utilizam a menor quantidade possível de defensivos, promovendo assim o desenvolvimento sustentável da região e a permanência harmônica dos pequenos produtores familiares com possíveis ciclos de escassez.

Palavras-chave: Planejamento Sustentável. Modelo Matemático. Perímetro Irrigado. Área Ótima.

ABSTRACT

To address the challenge of water scarcity in the hinterlands of Paraíba, it is of the utmost importance to improve mathematical optimization techniques that promote the efficient use of water in irrigated areas on small rural farms. Thus, the main objective of this research is to propose a mathematical optimization model that enables the implementation of sustainable agricultural planning by determining the optimal areas to be cultivated for each crop, taking into account profitability, job creation, and minimal use of pesticides. Also noteworthy is the incorporation of a crop rotation schedule featuring diversified, adaptable crops with low water consumption and the use of efficient irrigation systems. Next, a sustainable objective function was defined, incorporating priority levels and constraints related to the maximum irrigable

area, the volume of available water, and crop rotation. The proposed mathematical model was validated using available data from family-owned plots in the São Gonçalo Irrigated Perimeter, located in the city of Sousa, Paraíba, which enabled the establishment of the planned operational scenario. However, the developed model identified a selection of ranked, more profitable crops that generate more job opportunities and use the least possible amount of pesticides, thereby promoting the region's sustainable development and enabling small family farmers to adapt harmoniously to potential periods of scarcity.

Keywords: Sustainable Planning. Mathematical Model. Irrigated Perimeter. Optimal Area.

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial para todas as atividades humanas, em contextos tanto rurais quanto urbanos. Com o avanço da produção e do consumo global, projeta-se um aumento de 20% a 30% na demanda por água até 2050, sendo a agricultura responsável por cerca de 70% desse uso, seguida pela indústria e pelo consumo doméstico. Esse crescimento é impulsionado pela expansão industrial, pela intensificação da agricultura irrigada e pelo aumento do consumo nos países em desenvolvimento. Desde os anos 1980, a demanda global tem crescido cerca de 1% ao ano, refletindo o impacto direto do crescimento populacional, da urbanização e das mudanças nos padrões de consumo, fatores que agravam a escassez hídrica (UNESCO, 2024).

O uso inadequado da água pode gerar consequências significativas para sua disponibilidade, agravando ainda mais a já preocupante escassez desse recurso essencial. Além disso, observa-se uma gestão ineficiente dos recursos hídricos, o que provoca um descompasso entre a oferta e a demanda. Diante disso, torna-se essencial adotar estratégias de conservação e uso racional da água, como a reutilização e a aplicação de práticas sustentáveis na atividade agrícola, visando mitigar os impactos da escassez, sobretudo em áreas de clima semiárido.

A escassez de água nas comunidades rurais, tanto em quantidade quanto em qualidade, destinada ao consumo humano, à produção agrícola e à dessedentação animal, tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias sociais acessíveis, como cisternas, barreiros e captação de água de telhados, que contribuem significativamente para a convivência com o semiárido (SILVA; BRITO, 2023).

A distribuição desigual da água no Brasil acentua a crise hídrica em diversas regiões. Embora o país disponha de cerca de 12% da água doce global, a região Norte concentra 68% desse volume, enquanto Sudeste e Nordeste somam apenas 9% do total, apesar de abrigarem quase 50% da população. Em março de 2022, a ANA informou que cerca de 35 milhões de

brasileiros sofriam com a escassez de água, com mais de 1.300 municípios em estado de emergência por falta de chuvas. Além disso, estudos divulgados em 2024 pela ANA indicam que, devido às mudanças climáticas, a disponibilidade hídrica pode diminuir em até 40% em importantes bacias das regiões Norte, Nordeste, Centro Oeste e parte do Sudeste até 2040, com crescente número de rios intermitentes e redução nas chuvas, o que eleva a vulnerabilidade dessas regiões.

A irrigação é uma prática milenar utilizada pela humanidade com o objetivo de garantir a subsistência familiar, a produção agrícola e a continuidade das dinâmicas sociais. O Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG), localizado no município de Sousa, no sertão da Paraíba, configura-se como uma das principais fontes de sustento para inúmeras famílias. Além disso, exerce um papel relevante no fornecimento de frutas tanto para o mercado local quanto para outras regiões do país, representando um importante ativo econômico para o semiárido paraibano. Entre as principais atividades desenvolvidas na área, destacam-se a produção de coco e banana. Também se sobressaem a pecuária, voltada à produção de leite, carne e animais para reprodução e o crescimento da aquicultura. No entanto, diante dos conhecidos desafios ambientais e da evidente fragilidade na gestão dos recursos hídricos da região, torna-se essencial à proposta de um algoritmo matemático que incorpore princípios de sustentabilidade e seja capaz de analisar, de forma eficiente, a viabilidade financeira da irrigação local. O uso de ferramentas otimizadas pode impulsionar o progresso econômico, social e ambiental do território.

O desenvolvimento de uma tecnologia inovadora capaz de enfrentar os desafios relacionados à escassez e ao uso ineficiente da água é essencial para assegurar a segurança hídrica diante de períodos de estiagem e condições climáticas adversas. Nesse contexto, a realização de estudos e investigações fundamentadas em bases científicas e técnicas tornam-se indispensável para a construção de um algoritmo matemático que favoreça o uso racional e sustentável desse recurso vital. O propósito central é contribuir para o progresso econômico, social e ambiental da região. Dessa forma, a aplicação dos conhecimentos científicos consolidados por pesquisas anteriores é fundamental para estruturar um algoritmo que fortaleça a gestão hídrica e colabore na superação dos problemas ligados à escassez e ao manejo inadequado da água. Diante desse contexto, a presente pesquisa busca responder à seguinte questão: Como o modelo de otimização proposto conseguirá promover o planejamento sustentável considerando limitações do sistema como a área máxima irrigável,

o volume de água disponível e a rotatividade de culturas com níveis de prioridades da rentabilidade, da geração de emprego e do uso de defensivo agrícola?

Com base neste contexto, objetivo geral deste trabalho está em desenvolver um modelo de otimização que determine as áreas ótimas por cultura priorizando um cenário de operação seco que maximize a geração de emprego, a rentabilidade e minimize o uso de defensivos agrícolas considerando as limitações das pequenas propriedades rurais do perímetro irrigado de São Gonçalo, localizado no sertão paraibano.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG) destacou-se como um dos primeiros projetos de irrigação implantados no Semiárido brasileiro no início da década de 1970. A sua construção e administração foram conduzidas pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), sendo este responsável pela execução e manutenção dessa importante iniciativa no município de Sousa, na Paraíba (SOARES, 2018; 2024).

Desde sua implantação, o PISG tem sido fundamental para a irrigação e o desenvolvimento agrícola e socioeconômico da região. Para tanto, a intensa exploração dos recursos hídricos, impulsionada pela expansão do mercado durante os chamados “anos dourados”, comprometeu a sustentabilidade do perímetro irrigado. Esse modelo de uso excessivo levou ao declínio progressivo do PISG, agravado pelo esgotamento do açude de São Gonçalo em 2016, culminando na paralisação das atividades irrigadas em 2017.

O colapso do perímetro ganhou ampla repercussão na mídia, sendo frequentemente atribuído apenas à escassez de chuvas, o que reforçou a interpretação da seca como um fenômeno exclusivamente natural. No entanto, estudos recentes evidenciam que a crise hídrica é resultado também da intervenção humana, como a gestão inadequada dos recursos e a pressão sobre os mananciais (Silva et al., 2023; Agência Nacional de Águas, 2024). Essa visão integrada é fundamental para o planejamento de estratégias que garantam a recuperação e a sustentabilidade dos perímetros irrigados no semiárido brasileiro.

Esse cenário evidencia a persistência de uma visão equivocada sobre a água como recurso inesgotável, mentalidade que ainda prevalece em parte da sociedade no século XXI. Embora o Brasil detenha a maior reserva de água doce do planeta, enfrenta desafios significativos na gestão eficiente e sustentável desse recurso vital. Para enfrentar tais desafios, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), criada em 1997, junto ao Sistema Nacional

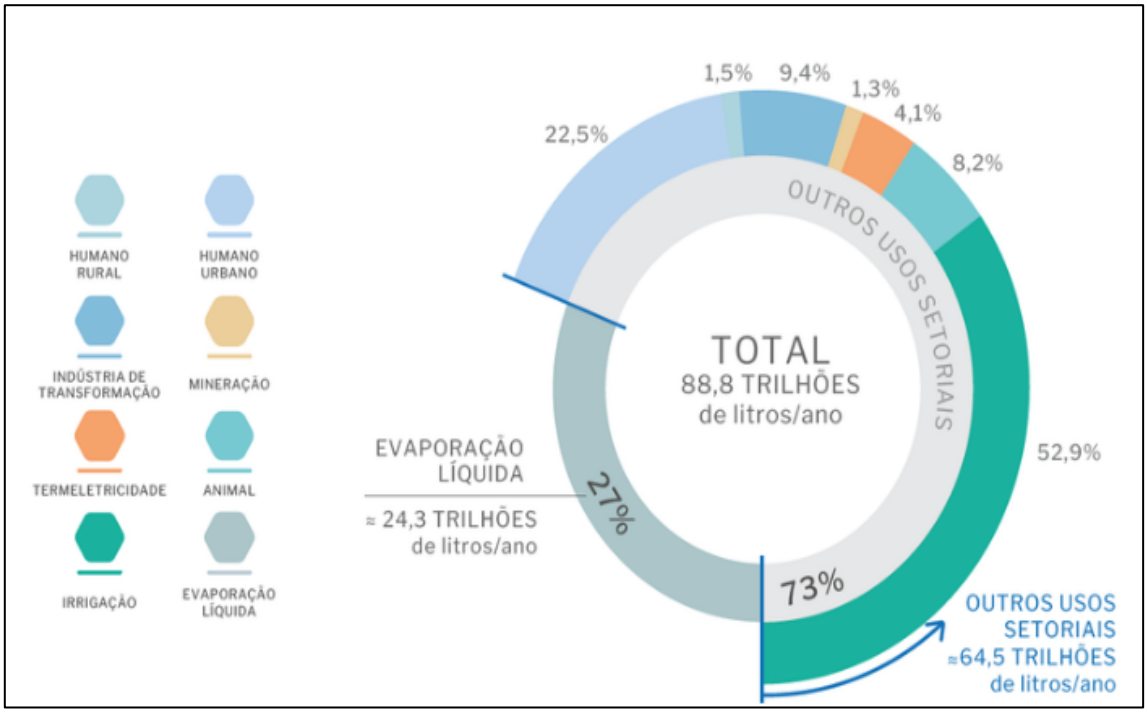
de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNRH), continua sendo a base normativa para a administração da água no país. Essas iniciativas promovem a sustentabilidade, a descentralização da gestão e o reconhecimento da água como recurso estratégico para o desenvolvimento social e econômico (ANA, 2023; Ministério do Desenvolvimento Regional, 2024).

Segundo Araújo et al (2012), o Nordeste brasileiro é com frequência apresentado em vários discursos como uma região de pouca relevância econômica. Essa imagem distorcida não corresponde à sua realidade, mas sim a uma percepção fixa sustentada por estereótipos, narrativas e representações que desvalorizam sua verdadeira identidade.

A visão predominante associa o clima semiárido a condições de vida severas, indicando que a pobreza na região é persistente, mesmo com a implementação de políticas públicas direcionadas ao bem-estar social (Carvalho, 2013 e Freitas, 2012). Certas análises relacionam o declínio da produtividade no Perímetro Irrigado de São Gonçalo exclusivamente à escassez de água. Por exemplo, Silva et al. (2017), em sua pesquisa sobre os efeitos da falta de recursos hídricos na economia local, ressaltam que a insuficiência de água inviabiliza a produção agrícola e compromete a manutenção de uma vida digna para a população, gerando fome e pobreza.

Conforme a ANA (2022), o Brasil retira cerca de 88,8 trilhões de litros de água por ano, dos quais 73% são destinados a usos diversos e 27% se perdem por evaporação. A irrigação é o maior consumidor setorial, com 52,9% do total usado, seguida pelo abastecimento urbano (22,5%) e rural (9,4%). Outros setores, como indústria, pecuária, geração termoelétrica e mineração, representam menores parcelas. Esses dados destacam a agricultura irrigada como principal demandante, evidenciando a necessidade de gestão eficiente para a sustentabilidade dos recursos hídricos. A Figura 01 monstra os dados da retirada de água no Brasil, no ano de 2022.

Figura 1 – Retirada de água no Brasil em 2022.



Fonte: ANA (2022).

Para enfrentar os desafios decorrentes da escassez de água, é fundamental promover a busca constante por inovações e novas abordagens no manejo dos recursos hídricos, tanto para uso doméstico quanto agrícola. Vários estudos desenvolvidos no Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG) têm colaborado para a criação de soluções eficientes.

Araújo (2018) ressaltou a importância de um modelo de gestão eficaz que estimule o uso consciente da água, considerando as distintas necessidades das atividades agrícolas. Ele sugeriu a implantação da BTM, uma barragem trincheira modificada que reduz as perdas por infiltração e evaporação. Já Queiroga (2019) avaliou os aspectos econômicos e ambientais do modelo apresentado por Araújo (2018), confirmando sua eficácia, mas sublinhando a necessidade de desenvolver novas estratégias para a gestão da água. Pessoa e Vieira (2015) recomendou a substituição da irrigação por inundação pelo sistema de gotejamento, demonstrando sua eficiência na conservação hídrica e na identificação de culturas mais lucrativas e sustentáveis.

Diante da complexidade crescente na gestão dos recursos hídricos e da produção agrícola, a utilização de modelos matemáticos e computacionais tem se tornado cada vez mais frequente. Os Sistemas de Apoio à Decisão (SAD) destacam-se como ferramentas estratégicas, capazes de processar, simular e otimizar informações para apoiar o processo decisório (Braga, 1987).

Assim, torna-se clara a relevância da pesquisa e da inovação tecnológica para o aprimoramento da gestão da água e da produção no PISG. A busca constante por soluções sustentáveis e eficazes é fundamental para assegurar a disponibilidade de água e fomentar o desenvolvimento socioeconômico da região.

3. METODOLOGIA

De acordo com Bloise (2020), a metodologia desempenha um papel essencial ao assegurar a organização e a coerência da pesquisa conduzida pelo pesquisador, oferecendo uma orientação clara a ser seguida. Ela compreende a explicação minuciosa dos métodos, técnicas e procedimentos utilizados no estudo, incluindo as etapas de coleta e análise de dados, bem como a interpretação dos resultados. Além disso, destaca as vantagens e limitações da abordagem adotada. Marconi e Lakatos (2021) ressaltam a importância da definição da metodologia, pois ela responde a perguntas fundamentais para a pesquisa, tais como: “como?”, “com o quê?”, “onde?” e “quanto?”.

Conforme Mezzaroba e Monteiro (2004, p. 65), o método dedutivo parte de argumentos “verdadeiros e inquestionáveis”, os quais são formulados de modo que a conclusão possa ser logicamente desenvolvida. Nesta pesquisa, optou-se pela pesquisa quantitativa, que, conforme Gil (2008), caracteriza-se pelo uso de dados numéricos para a análise e interpretação de fenômenos, buscando identificar relações de causa e efeito entre variáveis. Essa abordagem emprega métodos sistemáticos e estatísticos, frequentemente utilizando instrumentos padronizados para a coleta de dados mensuráveis.

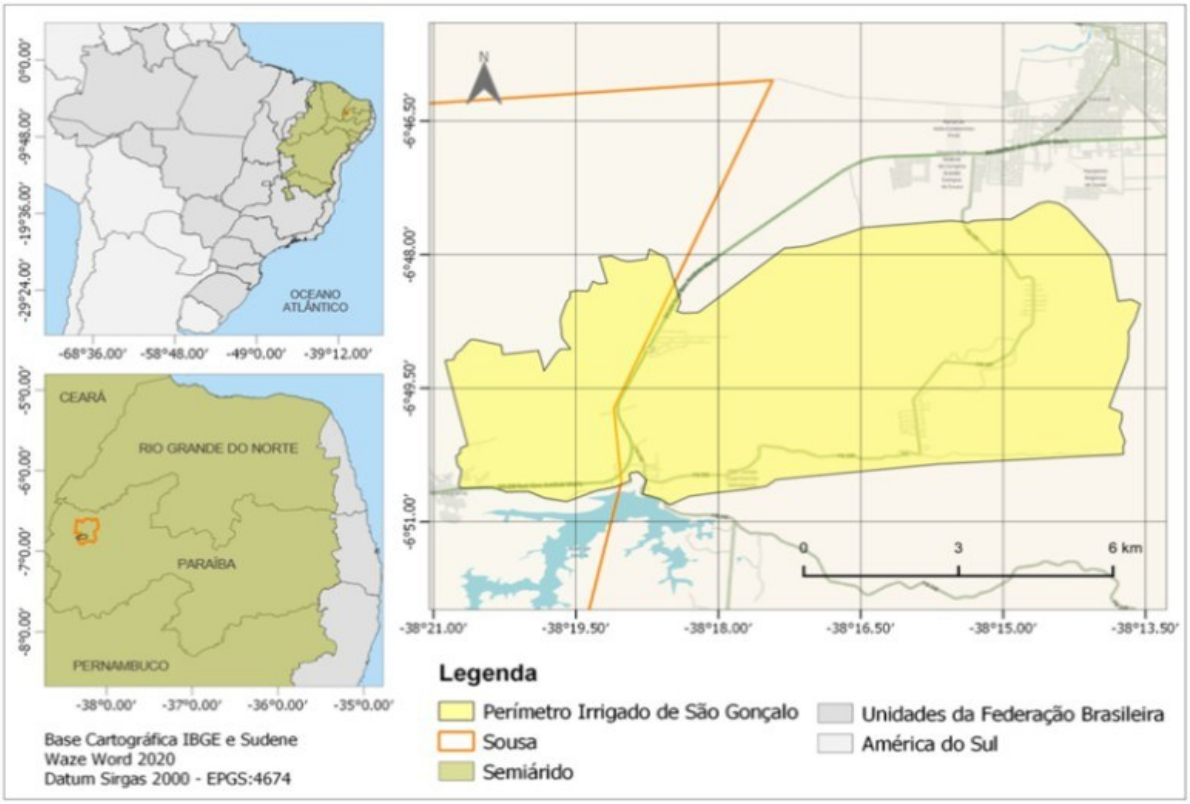
Nas informações coletadas, foram analisadas variáveis como o número de habitantes, as atividades econômicas, as diferentes formas de uso da água, o cultivo de culturas sazonais e perenes, entre outras. No que tange a validação desse modelo, todos os dados coletados, principalmente do perímetro irrigado de São Gonçalo/PB, foram copilados num cenário de operação planejado e integrados, como dados de entrada, ao modelo de otimização multiobjectivo e sustentável desenvolvido no software MATLAB. Esse sistema permite a realização de análises numéricas, operações matriciais, processamento de sinais, simulações, otimizações e geração de gráficos. Dessa maneira, busca-se então viabilizar o modelo proposto, promovendo o desenvolvimento econômico e sustentável da região estudada.

3.1. ÁREA DE ESTUDO

O Perímetro Irrigado de São Gonçalo está localizado na bacia hidrográfica do Alto Piranhas, a cerca de 15 quilômetros da cidade de Sousa, no Estado da Paraíba, região Nordeste do Brasil, aproximadamente 440 quilômetros distante da capital João Pessoa/PB. Suas coordenadas geográficas são 06°50'22" S e 38°18'39" W.

O período de chuvas na região ocorre entre janeiro e maio, com uma precipitação média anual de 894 mm, conforme dados do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS, 2016). A temperatura média anual é de 27°C, variando entre mínimas de 22°C e máximas que podem alcançar 38°C. A evaporação média anual registrada é de 3.056,6 mm, e o clima é classificado como semiárido quente. A localização geográfica do PISG está ilustrada na Figura 2:

Figura 2 – Localização Geográfica do Perímetro Irrigado de São Gonçalo/PB.



Fonte: QUEIROZ; ALVES; SILVA (2020).

O terreno apresenta relevo predominantemente plano, com algumas pequenas elevações suaves. Os solos predominantes são formados por depósitos sedimentares típicos de áreas sujeitas a inundações, compostos principalmente por sedimentos aluviais de textura que varia de média a argilosa. Também são encontrados solos do tipo verti solo, de textura argilosa e profundidade média, além de podzólicos, cuja textura varia entre arenosa e argilosa,

apresentando fertilidade natural que varia de boa a média. No Perímetro Irrigado de São Gonçalo, são cultivadas diversas culturas agrícolas, como banana, coco, goiaba, maracujá, arroz, feijão, milho, tomate para mesa, algodão herbáceo e capim para corte. A região também se destaca na criação de gado para produção de leite e carne, com a criação de bovinos e ovinos para reprodução (DNOCS, 2016).

3.2. COLETA DE DADOS E CENÁRIO DE OPERAÇÃO

Primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica ampla sobre estudos relacionados ao Perímetro Irrigado de São Gonçalo/PB (PISG), complementada por um levantamento de dados disponíveis na literatura científica e em bancos de dados institucionais e nacionais. As informações coletadas abordam a infraestrutura, as atividades econômicas e sociais da região, com destaque para a produção agrícola e a irrigação. Entre as principais fontes de dados utilizadas estão a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), a Agência Nacional de Águas (ANA), o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e a Planilha de Orçamento de Culturas Agrícolas do Banco do Nordeste do Brasil (2024). A coleta de dados foi direcionada de acordo com as variáveis requisitadas do modelo matemático que permita avaliar a viabilidade da irrigação, o uso eficiente dos recursos hídricos numa escala de tempo anual e escolher as culturas mais sustentáveis para a região estudada.

Foram selecionadas 22 culturas agrícolas, das quais doze são perenes ou semiperenes (banana, morango, manga, coco, maracujá, mamão, limão, uva, pitaya, abacaxi e goiaba) e treze são culturas sazonais ou temporárias (algodão, feijão, milho, caju, melancia, melão, tomate, gergelim, pimentão, mandioca e sorgo). As culturas sazonais são cultivadas duas vezes ao ano, na safra (s) e na entressafra (es), o que foi considerado na modelagem para estimar a área irrigável ideal e maximizar a produtividade. Dessa forma, esse estudo contribui ainda, para uma análise integrada dos fatores que influenciam a gestão sustentável da água em pequenas propriedades rurais no sertão paraibano, especialmente no perímetro irrigado de São Gonçalo/PB, propondo alternativas sustentáveis e fundamentadas para a otimização do uso dos recursos hídricos.

A Tabela 1 apresenta os dados coletados e adpatados para o planejamento do perímetro. Os valores de receita bruta, custo de produção, custo da água, do custo de

implementação e tipo de sistema sugerido por culturas foram obtidos a partir da Planilha de Orçamento de Culturas Agrícolas do Banco do Nordeste do Brasil (2024).

Os preços médios de comercialização das culturas foram coletados no site da Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas (EMPASA, 2024). O consumo médio de energia foi obtido através da Cooperativa Agropecuária dos Irrigantes do Projeto Piancó (COIPI, 2003) e atualizado de acordo com a inflação e está incluso no custo operacional.

Tabela 1 – Dados de entrada financeiros e técnicos das culturas no cenário de operação.

CULTURAS	RBj (R$/ha)	CPj (R$/ha)	CCj (R$/ha)	CAj (R$/ha)	Sistema de Irrigação
Morango	15000,00	5000,00	3000,00	800,00	Microaspersão
Pitaya	12000,00	4500,00	2500,00	700,00	Microaspersão
Uva	18000,00	6000,00	4000,00	1000,00	Microaspersão
Manga	8000,00	3000,00	2000,00	400,00	Microaspersão
Goiaba	7500,00	2800,00	1800,00	350,00	Microaspersão
Maracujá	9000,00	3500,00	2200,00	450,00	Microaspersão
Caju	6000,00	2500,00	1500,00	300,00	Microaspersão
Coco	5000,00	2000,00	1200,00	250,00	Microaspersão
Banana	7000,00	3200,00	1900,00	400,00	Microaspersão
Abacaxi	8500,00	3800,00	2000,00	420,00	Microaspersão
Mamão	6500,00	3000,00	1700,00	380,00	Microaspersão
Limão	5500,00	2500,00	1400,00	320,00	Microaspersão
Mandioca (s) e (es)	4000,00	1500,00	1000,00	200,00	Gotejamento
Feijão (s) e (es)	3500,00	1200,00	900,00	180,00	Gotejamento
Milho (s) e (es)	3000,00	1000,00	800,00	150,00	Gotejamento
Sorgo (s) e (es)	3200,00	1100,00	850,00	160,00	Gotejamento
Algodão (s) e (es)	4500,00	1800,00	1100,00	220,00	Gotejamento
Gergelim (s) e (es)	3800,00	1500,00	950,00	190,00	Gotejamento
Melancia (s) e (es)	5000,00	2000,00	1200,00	250,00	Gotejamento
Melão (s) e (es)	5200,00	2100,00	1250,00	260,00	Gotejamento
Pimentão (s) e (es)	6500,00	2500,00	1500,00	300,00	Gotejamento
Tomate (s) e (es)	6000,00	2300,00	1400,00	280,00	Gotejamento

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Sendo que: RBj – Receita bruta em reais por hectares no perímetro j; CPj – Custo operacional em reais por hectares no perímetro j; CCj – Custo de cultivo ou implementação em reais por hectares no perímetro j; CAj – Custo da água em metro cúbico por hectares no perímetro j;

As informações sobre a eficiência do sistema de irrigação, dias trabalhados, uso de defensivos agrícola foram coletados do livro de Gomes (1999) e EMBRAPA (2024), enquanto a eficiência de aplicação foi obtida conforme a Resolução nº 687 da Agência Nacional de Águas (ANA, 2004).

Tabela 2 – Dados de entrada técnicos e operacionais das culturas no cenário de operação.

CULTURAS	Ntj (Dias/ha)	Qdj (Kg/ha)	CHj (m^3/ha)	Apmax (ha)	Ef	Ea
Morango	120	5,00	3500,00	20,00	0,90	0,90
Pitaya	90	3,00	2800,00	30,00	0,90	0,90
Uva	150	8,00	4200,00	25,00	0,90	0,90
Manga	60	2,00	2500,00	40,00	0,90	0,90
Goiaba	55	2,00	2300,00	35,00	0,90	0,90
Maracujá	70	4,00	3000,00	30,00	0,90	0,90
Caju	45	1,00	2000,00	50,00	0,90	0,90
Coco	40	1,00	1800,00	60,00	0,90	0,90
Banana	65	3,00	2700,00	45,00	0,90	0,90
Abacaxi	75	3,00	2900,00	40,00	0,90	0,90
Mamão	60	2,00	2600,00	50,00	0,90	0,90
Limão	50	2,00	2200,00	55,00	0,90	0,90
Mandioca (s) e (es)	30	0,50	1500,00	70,00	0,92	0,95
Feijão (s) e (es)	25	0,50	1300,00	80,00	0,92	0,95
Milho (s) e (es)	20	0,30	1200,00	90,00	0,92	0,95
Sorgo (s) e (es)	22	0,40	1250,00	85,00	0,92	0,95
Algodão (s) e (es)	35	1,00	1600,00	60,00	0,92	0,95
Gergelim (s) e (es)	30	0,80	1400,00	65,00	0,92	0,95
Melancia (s) e (es)	40	1,50	1800,00	40,00	0,92	0,95
Melão (s) e (es)	42	1,60	1850,00	42,00	0,92	0,95
Pimentão (s) e (es)	50	2,00	2000,00	35,00	0,92	0,95
Tomate (s) e (es)	45	1,80	1900,00	38,00	0,92	0,95

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Sendo que: Ntj – Quantidade de dias trabalhados por hectares no perímetro j; Qdj – Quantidade de defensivos por hectares no perímetro j; CHj – Consumo hídrico no regime pluviométrico seco em metros cúbicos por hectares no perímetro j; Apmaxj – Área máxima irrigável para cada cultura por hectares no perímetro j; Ef – Eficiência do sistema no perímetro j; Ea – Eficiência de aplicação no perímetro j.

No entanto, o cenário de operação foi constituído com base nas Tabelas 1 e 2 e com base nos níveis de prioridades do modelo de otimização que no caso foi atribuído pesos que na qual priorizou cada objetivo por vez, considerando à maximização da receita líquida, a maximização da quantidade de dias de mão-de-obra e a minimização do uso de defensivos agrícolas, além disso, foram considerados pesos iguais para cada objetivo. É importante lembrar que além dos objetivos da função serem atendidos, a escolha das culturas estão limitadas pela rotatividade por cultura, volume de água disponível (Vmax), que no caso foi de 1 hm^3 (hectômetro cúbico) e uma área máxima irrigável ($Amax_j$) disponível de 500 ha (hectares).

3.3. MODELO DE OTIMIZAÇÃO PROPOSTO

As varáveis do sistema estudado foram essenciais na composição da função multiobjectivo e sustentável (FMO), estruturada para contemplar três metas simultâneas: a maximização da receita líquida, a alocação de dias trabalhados no campo e a redução do uso de defensivos agrícolas, conforme a equação 1, a seguir:

Função objetivo

$$FO = \alpha_1 * \left[RB_j - \sum_{j=1}^{nc} (CP_j + CC_j + CA_j) * A_j \right] + \alpha_2 * \sum_{j=1}^{nc} Nt_j * A_j - \alpha_3 * \sum_{j=1}^{nc} Q_{dj} * A_j \quad (1)$$

Sendo que: A_j – Variáveis de decisão da área por cultura no perímetro irrigado j; e α_i – coeficientes de prioridades do modelo.

Sujeito a:

$\sum_{j=1}^{nc} A_j \leq Amax_j$ limitação da área máxima irrigável (2)

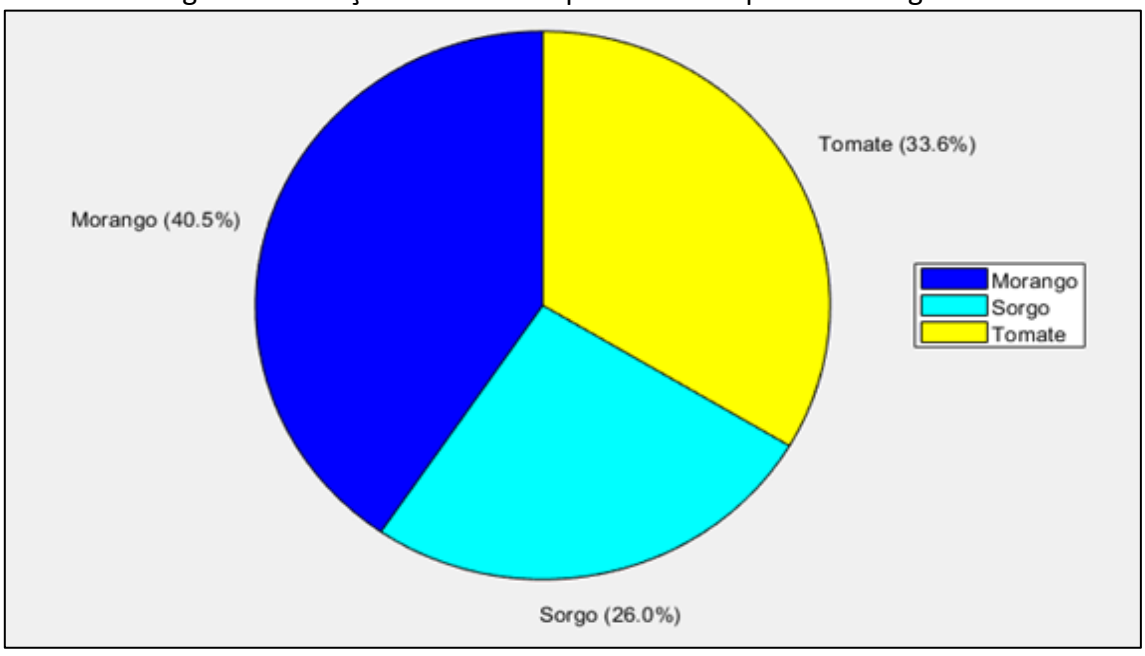
$\sum_{j=1}^{nc} CH_j * A_j \leq Vmax_j$ limitação do volume máximo de água disponível (3)

$0 \leq A_j \leq Apmax_j$ rotatividade das culturas (4)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, o modelo foi executado buscando um equilíbrio entre os objetivos. A solução encontrada propõe o cultivo de morango, tomate e sorgo. Essa combinação gerou uma receita líquida de R$ 1.332.721,93 e um total de 9.034,10 dias de trabalho.

Figura 3 – Seleção das culturas por área com prioridades iguais.

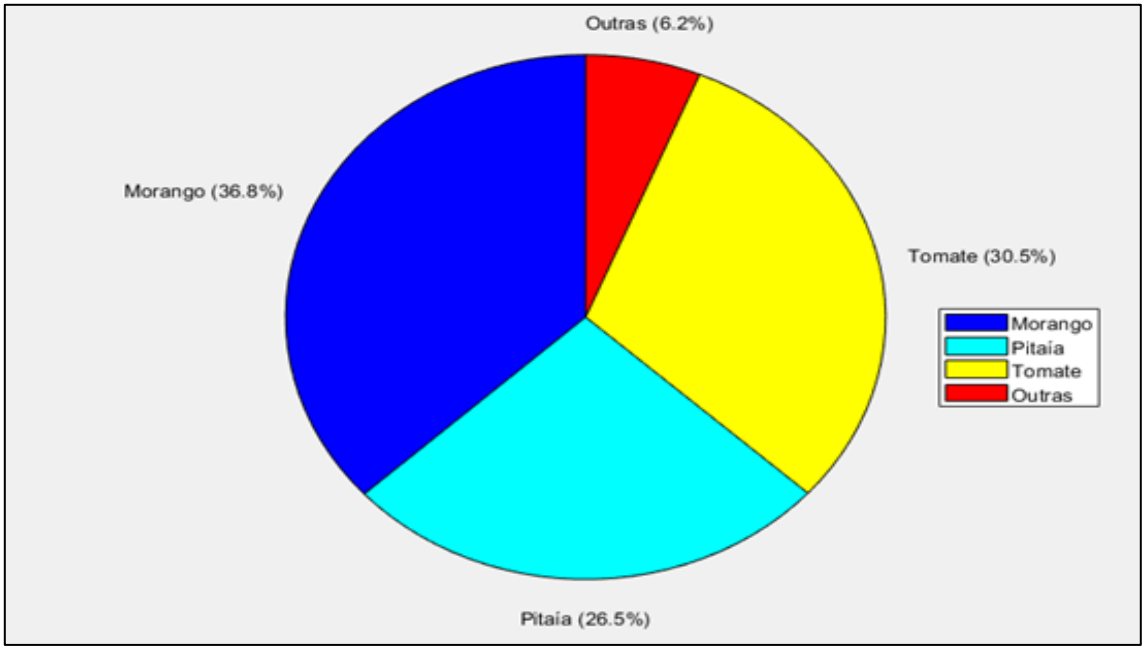


Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A escolha reflete uma estratégia mista: o morango e o tomate foram selecionados por seu alto potencial de receita, enquanto o sorgo, com a maior demanda de mão de obra de 252 hd/ha/ano, foi incluído para impulsionar o objetivo social. Esta abordagem inicial serve como nossa base de comparação.

Quando a prioridade foi ajustada para focar na máxima rentabilidade, o modelo alterou a seleção de culturas, substituindo o sorgo pela pitaya e pelo maracujá. Ambas as culturas foram escolhidas por seus altíssimos valores comerciais, visando maximizar o retorno financeiro. A Figura 4 monstra os dados da distribuição da área por cultura priorizando a receita.

Figura 4 – Seleção das culturas por área priorizando a receita líquida.

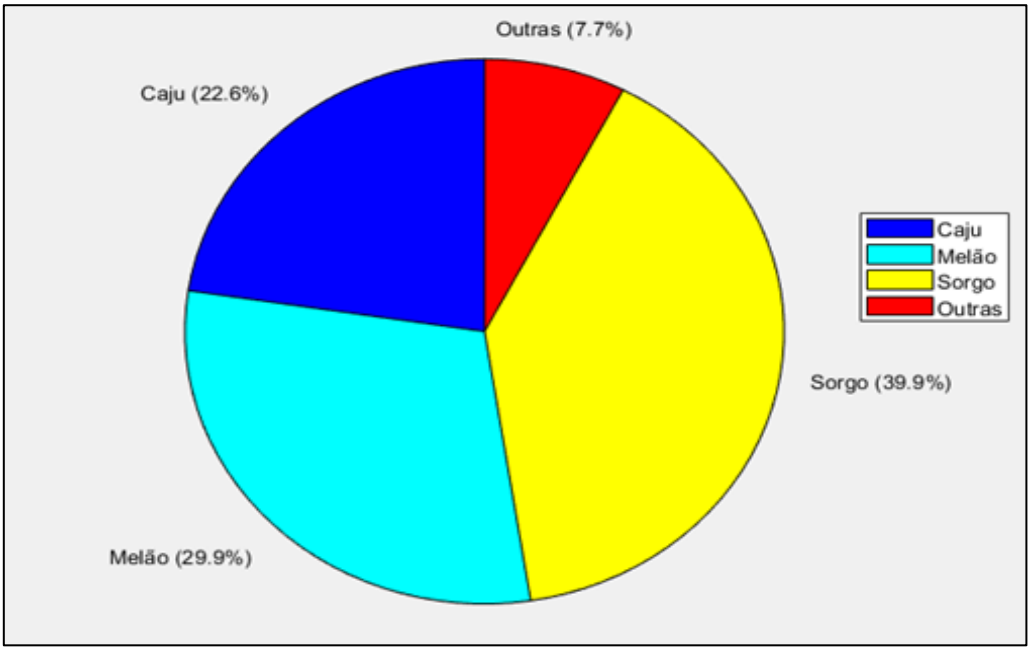


Fonte: Dados da pesquisa (2025).

O resultado foi um salto na receita líquida para R$ 1.752.384,84, um aumento de mais de 31%. No entanto, essa decisão teve um custo direto: 1) O número de empregos gerados caiu para 7.330,59 dias, uma perda de quase 20% das vagas; 2) O uso de defensivos agrícolas aumentou quase 10%, chegando a 1.079,35 kg; e 3) Fica claro o trade-off: a busca pelo lucro máximo sacrifica o pilar social e aumenta o impacto ambiental do cultivo.

Em seguida, a prioridade foi invertida para a maximização da mão de obra. Nesta simulação, o modelo reconfigurou a fazenda, focando em sorgo, melão e caju, culturas conhecidas por demandarem muita mão-de-obra. A Figura 5 exibe os dados referentes à alocação da área por cultura, com foco na intensificação da mão de obra.

Figura 4 – Seleção das culturas por área priorizando a receita líquida.



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Essa estratégia elevou a geração de empregos ao seu pico, com 9.485,28 dias de trabalho. O preço dessa decisão foi uma queda brutal na receita, que despencou para R$ 323.468,85. No entanto, essa abordagem revelou uma sinergia surpreendente e valiosa: O uso de defensivos caiu para 704,44 kg, o menor nível entre todas as simulações produtivas. No entanto, este resultado sugere que uma política focada em emprego pode ter o benefício de promover uma agricultura com menor dependência de agrotóxicos.

E finalmente, para testar os limites do modelo, a prioridade máxima foi dada à minimização de defensivos. A resposta do algoritmo foi lógica e direta: para ter zero uso de defensivos, a única solução é não plantar nada. Todos os indicadores, receita, mão de obra e defensivos, foram, portanto, nulos. A análise das diferentes estratégias revela que a gestão da propriedade é um ato de equilíbrio. Em todas as simulações onde houve plantio, um fator foi constante: a água foi sempre o recurso limitante, com 100% de sua disponibilidade (1.000.000 m^3) utilizada. Isso reforça que, independentemente da estratégia, a eficiência hídrica é a condição essencial para a viabilidade de qualquer projeto agrícola no semiárido.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste algoritmo matemático representa um passo fundamental para a otimização da gestão de recursos hídricos e para a mitigação dos impactos da escassez de água no sertão paraibano. Ao longo da pesquisa, as atividades agrícolas mais relevantes da

área de estudo foram identificadas e integradas a uma ferramenta computacional projetada para ser intuitiva e prática. Embora o modelo em sua versão atual já permita determinar a área ótima irrigável por cultura, sua eficácia máxima depende de uma avaliação rigorosa por profissionais qualificados, que poderão refinar os parâmetros para a área de aplicação específica, gerando benefícios como planejamento eficiente, controle de custos e uso otimizado da água. Essa pesquisa, mesmo com o modelo ainda em desenvolvimento que irá abranger outras atividades econômicas, cumpriu seus objetivos iniciais de criar uma ferramenta sustentável para avaliar a viabilidade técnica e financeira em pequenas propriedades rurais localizados nos perímetros irrigados. Os resultados obtidos até aqui não apenas validam a abordagem, mas também oferecem soluções estratégicas claras. A análise dos cenários demonstra que a gestão da propriedade é um complexo ato de equilíbrio entre metas econômicas, sociais e ambientais. A busca exclusiva pela máxima rentabilidade, por exemplo, eleva a receita em mais de 31%, mas ao custo de uma redução de quase 20% nos empregos e um aumento de 10% no uso de defensivos. Por outro lado, priorizar a geração de empregos, embora reduza drasticamente a receita, apresenta o cobenefício de diminuir o uso de agrotóxicos. A solução mais promissora reside, portanto, na adoção de uma estratégia de gestão equilibrada e níveis de prioridades iguais, que o modelo proposto é capaz de identificar. Considerando que a água se revelou o recurso limitante em todos os cenários produtivos, com 100% de sua disponibilidade utilizada, a principal recomendação prática é a transição para sistemas de irrigação mais eficientes. A utilização da microaspersão e do gotejamento, em substituição a prática por inundação, é uma medida essencial para maximizar a produção com a água disponível. Após a validação, sugere-se a implementação das recomendações do modelo em uma propriedade rural por um período plurianual. Isso permitirá avaliar o desempenho da ferramenta em condições reais de variações climáticas e de mercado, testando sua resiliência e adaptabilidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos, a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), O Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) pelas bolsas de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Relatório de usos da água no Brasil. Brasília: ANA, 2022 e 2024. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/usos-da-agua.

PARAÍBA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA). Aesa-PB. João Pessoa, 2026. Disponível em: https://www.aesa.pb.gov.br/. Acesso em: 27 set. 2024.

ARAÚJO, I. D. C.; VIEIRA, A. S.; QUEIROGA, F. A.; FIGUEIREDO, F. N. L.; SILVA, I. B.; SARMENTO, R. C. S. S.; Proposta de um modelo de gestão para o uso eficiente da água no perímetro irrigado de São Gonçalo no sertão paraibano; Revista Brasileira de Gestão Ambiental v. 12 n. 1, 2018.

ARAÚJO, J. C.; GHEYI, H. R. et al. Recursos hídricos em regiões semiáridas: estudos e aplicações. Bahia: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2012. Disponível em: http://www.insa.gov.br/wp-content/themes/insa_theme/acervo/recursos-hidricos-II.pdf. Acesso em: 26 mai. 2021.

BRAGA JR., B. P. F., Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos. In: Modelos para o gerenciamento de recursos hídricos. NOBEL/ABRH. São Paulo, pp. 427 – 518, 1987.

BANCO DO NORDESTE. Portal Banco do Nordeste. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/. Acesso em: 05 mai. 2024.

BLOISE, D. M. A importância da metodologia científica na construção da ciência. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 06, Vol. 06, pp. 105-122. Junho de 2020. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: https://www.nucleodoconhecimento.com.br/educacao/metodologia-cientifica, DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/educacao/metodologia-cientifica.

CARVALHO, S. B. Técnicas de uso sustentável da água: sistemas alternativos de abastecimento de água em comunidades rurais na chapada do Araripe-CE. 2013. 112f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte, 2013. Disponível em: http://proder.ufca.edu.br/wp-content/uploads/sites/19/2016/04/19.pdf. Acesso em: 27 mar. 2021.

COOPERATIVA AGROPECUÁRIA DOS IRRIGANTES DO PROJETO PIANCÓ (COIPI). Portal COIPI. 2003. Disponível em: coipi.com.br. Acesso em: 05 abr. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONA DE OBRAS CONTRA A SECA - DNOCS. Perímetro Irrigado de São Gonçalo, Fortaleza, 2016.

EMBRAPA. Portal Embrapa. Brasília, DF: Embrapa, 2024. Disponível em: https://www.embrapa.br/. Acesso em: 12 out. 2024.

EMPASA. Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas (EMPASA). Paraíba. João Pessoa: Governo do Estado da Paraíba, [s.d.]. Disponível em: https://paraiba.pb.gov.br/. Acesso em: 05 mar. 2024.

FREITAS, M. I. A. Sub-bacia do Alto Piranhas, sertão paraibano: percepção ambiental e perspectiva na gestão dos recursos hídricos. 2012. 163f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012. Disponível em: http://tede.biblioteca.ufpb.br/bitstream/tede/4526/1/Arquivototal.pdf. Acesso em: 28 mar. 2021.

GIL, A. C.; Métodos e Técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: atlas, 2008.

GOMES, H. P. Engenharia de irrigação: Hidráulica dos Sistemas Pressurizados, Aspersão e Gotejamento. 3. ed. Campina Grande: Ed. UFPB, 411 p. 1999.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Portal do IBGE. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/. Acesso em: 03 set. 2024.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. Fundamentos de metodologia científica. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021.

MEZZAROBA, O.; MONTEIRO, C. S. Manual de Metodologia da Pesquisa no Direito. São Paulo: Saraiva, 2004.

PESSOA, F. M.; VIEIRA, A. S. Planejamento Eficiente da Agricultura Irrigada: Um Estudo de Caso no Perímetro Irrigado de São Gonçalo no Semiárido Nordestino. 12.º SILUSBA – Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 2015.

QUEIROZ, J. G. ALVES, L. da S. F.; SILVA, J. B. Processos de degradação socioambiental: os impactos das atividades produtivas desenvolvidas no perímetro irrigado de São Gonçalo – Paraíba/Brasil. Novos Cadernos NAEA, Belém, v 2, p. 121-143, 2020.

QUEIROGA, F. de A. Análise Econômico-financeira, ambiental e social do modelo de gestão de lotes para os colonos do perímetro irrigado de São Gonçalo (PISG). Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Monografia. Sousa, 2019.

SILVA, P. C. G.; BRITO, L. T. L. Tecnologias para captação e uso da água em comunidades rurais no Semiárido. A lição da cisterna. Campina Grande: EDUEPB, 2023. p. 201–214. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1158115

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M.; Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação. Ed.rev. Atual - Florianópolis: Laboratório de Ensino da Distancia da UFSC, 2001.121P. (2009).

SILVA NETO, M. F. A Problemática da Salinização do Solo no Perímetro Irrigado de São Gonçalo-PB. 2013. 139 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, 2013.

SILVA, S. N.; LOPES, F. G.; ANDRADE, F. E.; FERREIRA, C. B.; DANTAS, M. C. A. M.; SIQUEIRA, E. C. Efeitos da escassez hídrica na economia do perímetro irrigado de São Gonçalo, Paraíba. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, Pombal, v. 12, n. 1, p. 132-137, 2017.

SOARES, J. A. Memorial de um sertão. Sousa [s.n.], 2018.

UNESCO. Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos. Água para um mundo sustentável. WWDR, 2015. Disponível em: http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015ExecutiveSummary_POR_web.pdf. Acesso em: 10 mai. 2021.

VIEIRA, A. S.; CURI, W. F.; An Optimal Linearized Quali-Quantitative MultiObjective Simulation Model to Planning and Managing Integrated Surface Resources Systems. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH AND APPLICATIONS (IJERA), v. 12, p. 6-16, 2022. DOI: 10.9790/9622-1201020616.

CAPÍTULO XIV

PADRÕES TEMPORAIS E HETEROGENEIDADE ENTRE FONTES NOS PREÇOS DE MILHO E TRIGO NO PARANÁ: UMA ABORDAGEM DE MINERAÇÃO DE DADOS

TEMPORAL PATTERNS AND CROSS-SOURCE HETEROGENEITY IN MAIZE AND WHEAT PRICES IN PARANÁ, BRAZIL: A DATA-MINING APPROACH

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-14

Diego Braga Santi [1]
Vicente Felipe Cordeiro Dos Santos [2]
André Luiz Dutra da Silva [3]
Wagner Henrique Machado Cichacz [4]

[1] Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), Guarapuava, Paraná, Brasil.
[2] Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), Guarapuava, Paraná, Brasil.
[3] Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), Guarapuava, Paraná, Brasil.
[4] Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), Guarapuava, Paraná, Brasil.

RESUMO

Este estudo caracteriza padrões temporais e diferenças entre fontes nos preços de milho e trigo no Paraná entre janeiro de 2007 e dezembro de 2024, combinando mineração de dados e métodos de séries temporais. Foram integradas 864 observações mensais do DERAL/SEAB-PR e do CEPEA/ESALQ-USP, expressas em R$/saca de 60 kg e deflacionadas pelo IPCA para reais de dezembro de 2024. A análise reuniu estatísticas descritivas, diferenças entre fontes, coeficiente de variação anual, índices sazonais, decomposição STL, regressão linear sobre médias anuais e um classificador logístico direcional com separação temporal entre treinamento (2007–2021) e teste (2022–2024). O CEPEA apresentou preços superiores ao DERAL nos 216 meses de cada cultura, com diferenças percentuais médias de 29,97% para milho e 14,55% para trigo; essa distância deve ser interpretada à luz das distintas referências de mercado das séries. No DERAL, o coeficiente de variação de todo o período foi de 38,22% para milho e 25,26% para trigo. A decomposição identificou mínimo de tendência em 2017 e máximos em 2021 para milho e 2022 para trigo. No teste temporal, a acurácia do classificador variou de 58,33% a 80,56%, evidenciando dependência da cultura e da fonte. Em conjunto, os resultados distinguem movimentos persistentes, sazonalidade e heterogeneidade entre referências de preço que não são evidentes na leitura isolada de cotações nominais.

Palavras-chave: Preços agrícolas. Séries temporais. Mineração de dados. Sazonalidade. Integração de dados.

ABSTRACT

This study characterizes temporal patterns and cross-source differences in maize and wheat prices in Paraná, Brazil, from January 2007 to December 2024 by combining data-mining and time-series methods. A total of 864 monthly observations from the Paraná Department of Rural Economy (DERAL/SEAB-PR) and the Center for Advanced Studies on Applied Economics (CEPEA/ESALQ-USP) were integrated, standardized to R$/60-kg bag, and deflated by the Brazilian IPCA to December 2024 reais. The analysis comprised descriptive statistics, cross-source price gaps, annual coefficients of variation, seasonal indices, STL decomposition, linear regression on annual means, and a directional logistic classifier using a chronological split between training (2007–2021) and testing (2022–2024). CEPEA prices exceeded DERAL prices in all 216 monthly observations for each crop, with mean percentage gaps of 29.97% for maize and 14.55% for wheat; these differences must be interpreted in view of the distinct market references represented

by each series. For DERAL prices, the full-period coefficient of variation was 38.22% for maize and 25.26% for wheat. STL trends reached their minimum in 2017 and peaked in 2021 for maize and 2022 for wheat. Out-of-sample classification accuracy ranged from 58.33% to 80.56%, showing dependence on crop and data source. Taken together, the results distinguish persistent movements, seasonality, and heterogeneity across price references that are not apparent from isolated nominal quotations.

Keywords: Agricultural prices. Time series. Data mining. Seasonality. Data integration.

1. INTRODUÇÃO

Preços agrícolas raramente evoluem como séries suaves. A produção é sazonal, os estoques ligam safras sucessivas, o transporte separa mercados no espaço e choques de oferta ou demanda podem deslocar rapidamente o nível das cotações. A literatura econômica reconhece há décadas que o armazenamento é uma peça central para compreender essa dinâmica e que restrições de estoques contribuem para a assimetria e para os episódios de elevação abrupta observados em commodities (Working, 1949; Deaton; Laroque, 1992). Em mercados de grãos, a relação entre consumo, disponibilidade física e estoques segue sendo decisiva para interpretar períodos de maior instabilidade de preços (Wright, 2011).

A leitura de uma série de preços também depende do que, precisamente, ela representa. Cotações referentes ao produtor, ao mercado disponível, a uma praça específica ou a um indicador empregado na liquidação de contratos não são intercambiáveis. Diferenças persistentes entre localidades e níveis de comercialização podem refletir custos de transporte, qualidade, condições contratuais, disponibilidade regional e outras características do processo de formação de preços. Essa distinção é fundamental em estudos de integração espacial de mercados, que tratam diferenças de preços como fenômenos econômicos a serem explicados, e não como simples ruído estatístico (Ravallion, 1986; Fackler; Goodwin, 2001).

No caso brasileiro, o milho e o trigo oferecem dois exemplos particularmente úteis. O milho está inserido em cadeias de alimentação animal, etanol, exportação e consumo humano, enquanto o trigo combina forte concentração regional da produção com participação relevante de importações. Estudos aplicados ao mercado nacional e ao Sul do Brasil já documentaram relações de longo prazo entre praças, transmissão de preços e padrões sazonais, com resultados que variam conforme o período, a fonte e a escala de análise (Santos et al., 2007; Sousa; Braga; Cunha, 2010; Melo; Moro, 2013; Melo, 2021). A ampliação das bases públicas torna possível avançar nessa leitura por meio de uma integração sistemática de séries e de técnicas de mineração de dados.

Há, entretanto, dois obstáculos recorrentes à análise histórica dessas cotações. O primeiro é monetário: comparar preços nominais de 2007 com preços nominais de 2024 mistura movimento de mercado com perda do poder de compra da moeda. O segundo é analítico: tabelas extensas ocultam tendência, sazonalidade, dispersão e mudanças de direção que se tornam mais claras quando as séries são harmonizadas e decompostas. Uma caracterização consistente exige, portanto, tornar os valores comparáveis e explicitar a estrutura temporal, em vez de tratar a sequência de cotações como mera coleção de observações.

O objetivo deste capítulo é caracterizar os padrões temporais e a heterogeneidade entre fontes nos preços mensais de milho e trigo no Paraná entre 2007 e 2024, integrando dados do DERAL/SEAB-PR e do CEPEA/ESALQ-USP. A contribuição está em reunir, em um fluxo analítico reproduzível, padronização de unidade, correção monetária pelo IPCA, comparação entre referências de preço, medidas de dispersão, índices sazonais, decomposição STL, regressão de tendência e classificação direcional fora da amostra. A ênfase é descritiva e metodológica: procura-se identificar estruturas persistentes e diferenças sistemáticas nas séries sem atribuir causalidade a relações que o desenho do estudo não permite estabelecer.

2. PREÇOS AGRÍCOLAS E ESTRUTURA TEMPORAL

2.1. FORMAÇÃO DE PREÇOS E COMPARABILIDADE ENTRE FONTES

A teoria de preços de armazenamento associa o comportamento intertemporal das commodities ao custo de carregar estoques e à arbitragem entre presente e futuro (Working, 1949). Em modelos competitivos com estoques não negativos, essa restrição introduz não linearidade e ajuda a explicar a combinação de persistência em períodos ordinários com picos ocasionais de preços (Deaton; Laroque, 1992).

Para séries observadas em diferentes pontos da cadeia, o problema ganha uma dimensão espacial e institucional. A análise de preços agrícolas distingue integração de mercado de igualdade mecânica entre cotações. Ravallion (1986) advertiu que correlações estáticas são insuficientes para testar integração, e Fackler e Goodwin (2001) sistematizaram a literatura sobre ligações espaciais, destacando transporte, comércio e custos de transação. Para o milho brasileiro, Santos et al. (2007) encontraram relação de longo prazo entre preços externo e interno, enquanto Sousa, Braga e Cunha (2010) identificaram interdependência entre mercados do Sul sem confirmação perfeita da Lei do Preço Único. Esses resultados

fornecem uma moldura adequada para interpretar divergências entre DERAL e CEPEA: séries que se movem na mesma direção podem manter níveis distintos porque medem mercados e condições comerciais diferentes.

2.2. TENDÊNCIA, SAZONALIDADE E DECOMPOSIÇÃO

Uma série mensal de preços pode ser lida como a superposição de movimentos de longo prazo, regularidades sazonais e oscilações irregulares. A decomposição STL, proposta por Cleveland et al. (1990), utiliza suavização local para separar tendência, componente sazonal e resíduo, com flexibilidade suficiente para séries mensais extensas. No presente estudo, essa decomposição não é empregada para produzir previsões, mas para revelar a geometria temporal das cotações reais do produtor.

A sazonalidade é especialmente relevante em produtos agrícolas porque calendário de plantio, colheita, armazenamento e comercialização altera a oferta disponível ao longo do ano. Para o Paraná, Melo e Moro (2013) observaram oscilações moderadas nos preços do trigo entre 2000 e 2012, sem evidência de forte variação sazonal no período. Para o milho, Melo (2021) também encontrou variação moderada, embora com mudança de amplitude associada ao maior peso da segunda safra. Esses estudos sugerem que a inspeção de índices mensais deve privilegiar magnitude e estabilidade do padrão, e não apenas a existência de meses acima ou abaixo da média.

2.3. PERSISTÊNCIA DIRECIONAL DE CURTO PRAZO

Como diagnóstico complementar da dinâmica mensal, um modelo transparente pode servir de referência para verificar se a informação contida no passado imediato persiste fora da amostra. A regressão logística é apropriada quando a resposta é binária e permite relacionar uma variável explicativa à probabilidade de ocorrência de um evento sem exigir que o preço em nível siga distribuição normal (McCullagh; Nelder, 1989).

Nesta aplicação, a pergunta é deliberadamente restrita: a variação real do mês anterior contém informação sobre a direção do preço no mês corrente? O desenho evita misturar observações futuras no treinamento e preserva a ordem temporal dos dados. Essa separação é importante porque avaliações aleatórias podem produzir estimativas excessivamente otimistas em séries ordenadas no tempo; a validação deve reproduzir, tanto quanto possível, o cenário em que o passado é utilizado para classificar períodos posteriores.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. FONTES, PERÍODO E UNIDADE DE ANÁLISE

A base cobre janeiro de 2007 a dezembro de 2024, totalizando 216 meses por combinação de cultura e fonte. Foram analisados milho e trigo em duas séries: DERAL/SEAB-PR e CEPEA/ESALQ-USP. Após a integração, o conjunto principal utilizado na comparação entre fontes continha 864 registros mensais (216 meses × 2 culturas × 2 fontes), sem valores ausentes no preço real.

O DERAL divulga preços recebidos pelos produtores no Paraná. Segundo a metodologia oficial, os preços semanais são coletados nos Núcleos Regionais, ponderados pela participação da produção regional na produção estadual e posteriormente agregados em média mensal; a coleta caracteriza preço à vista recebido pelo produtor, livre de impostos (Paraná, 2026). Para o milho do CEPEA foi utilizado o Indicador do Milho ESALQ/BM&FBovespa, expresso em reais por saca de 60 kg e com prazo de pagamento descontado. Para o trigo foi utilizado o Preço Médio do Trigo CEPEA/ESALQ – Paraná, referente a trigo pão ou melhorador e originalmente expresso em reais por tonelada (CEPEA, 2026a; 2026b).

Para tornar as unidades comparáveis, o preço do trigo do CEPEA foi convertido de R$/t para R$/60 kg multiplicando-se o valor por 0,06. Nenhuma conversão adicional foi necessária para o milho. Essa padronização de unidade não elimina as diferenças conceituais entre os indicadores: o DERAL representa o preço recebido pelo produtor paranaense, enquanto as séries CEPEA seguem especificações próprias de mercado e produto. Por isso, a comparação de níveis foi tratada como diferença entre referências de preço, e não como teste de superioridade de uma fonte sobre a outra.

3.2. CORREÇÃO MONETÁRIA E INTEGRAÇÃO DAS BASES

Os preços nominais foram convertidos para reais de dezembro de 2024 mediante o número-índice do IPCA, Tabela 1737 do SIDRA/IBGE. O número-índice de dezembro de 2024, igual a 7.100,50, foi tomado como referência. Para cada mês t, aplicou-se:

$$P_{r,t} = P_{n,t} \times (IPCA_{dez/2024} / IPCA_t)$$

em que $P_{r,t}$ é o preço real em reais de dezembro de 2024 e $P_{n,t}$ é o preço nominal observado no mês t. A correção foi aplicada separadamente a todas as combinações de cultura e fonte. O uso de preços reais evita interpretar inflação acumulada como valorização

econômica do produto e preserva a comparabilidade temporal das estatísticas descritivas e dos modelos.

As rotinas de preparação verificaram período, duplicidades, valores ausentes e valores infinitos. A série DERAL utilizada nas análises sazonais e na decomposição possuía os 216 meses de cada cultura; portanto, embora o script previsse interpolação linear para eventuais lacunas, nenhum preço de milho ou trigo precisou ser imputado. Os dados utilizados são secundários, públicos e agregados, sem participação de seres humanos e sem emprego de informação empresarial restrita.

3.3. MINERAÇÃO DESCRITIVA, DISPERSÃO E SAZONALIDADE

A mineração descritiva compreendeu média, mediana, mínimo, máximo, desvio-padrão e coeficiente de variação (CV) dos preços reais. A diferença mensal entre as fontes foi calculada como CEPEA − DERAL, e a diferença percentual, tomando DERAL como referência, por [(CEPEA/DERAL) − 1] × 100. A ocorrência de sinal positivo em todos os meses também foi verificada diretamente na base pareada.

Para a série DERAL, a dispersão intra-anual foi sintetizada pelo CV de cada ano, definido como 100 × desvio-padrão anual/média anual. Neste capítulo, a expressão volatilidade descritiva refere-se apenas a essa dispersão relativa; não se trata de volatilidade condicional estimada por modelos ARCH/GARCH. A sazonalidade foi calculada pela razão entre a média histórica de cada mês e a média geral da cultura, multiplicada por 100. Assim, índice superior a 100 indica mês historicamente acima da média real da série, enquanto valor inferior a 100 indica posição abaixo da média.

3.4. DECOMPOSIÇÃO STL E REGRESSÃO DE TENDÊNCIA

As séries mensais reais do DERAL foram transformadas em objetos com frequência 12 e decompostas pelo método STL com janela sazonal periódica (s.window = "periodic"). Essa configuração mantém um padrão sazonal fixo ao longo do período e estima separadamente tendência e resíduo. A opção é coerente com o objetivo de obter um retrato sintético do padrão mensal médio e identificar em que momentos a tendência de longo prazo atingiu vales e picos.

Em complemento, foram calculadas médias anuais reais para cada combinação de cultura e fonte e ajustada uma regressão linear simples $\bar{P}a = \beta 0 + \beta 1t + \varepsilon a$, com t = ano − 2007. Cada ajuste utilizou 18 observações anuais. Foram reportados coeficiente de inclinação,

intervalo de confiança de 95%, p-valor e R^2. A regressão foi empregada como descrição da associação linear entre tempo e preço médio anual; oscilações cíclicas e choques permanecem nos resíduos e não recebem interpretação causal.

3.5. MODELO LOGÍSTICO E AVALIAÇÃO TEMPORAL

O classificador direcional foi construído separadamente para cada fonte e cultura. A variação mensal real foi definida por $\Delta t = [(Pt/Pt-1) - 1] \times 100$. A variável resposta recebeu valor 1 quando $\Delta t > 0$ e 0 caso contrário; a única variável explicativa foi a variação do mês anterior, $\Delta t-1$. Após a criação das duas defasagens necessárias, restaram 214 observações por série.

Para preservar a sequência temporal, o treinamento compreendeu 2007–2021 (178 observações por série) e o teste, 2022–2024 (36 observações). Ajustou-se um modelo linear generalizado binomial com ligação logit, $\log[p/(1 - p)] = \beta 0 + \beta 1 \Delta t-1$. Probabilidades iguais ou superiores a 0,50 foram classificadas como aumento. O desempenho no período de teste foi avaliado por matriz de confusão, acurácia, sensibilidade e especificidade. Todo o fluxo analítico foi implementado em R, com uso principal de tidyverse, readxl e lubridate; as figuras apresentadas a seguir foram recompostas diretamente a partir das bases e das saídas validadas pelas rotinas analíticas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. NÍVEIS REAIS DE PREÇOS E DIFERENÇAS ENTRE DERAL E CEPEA

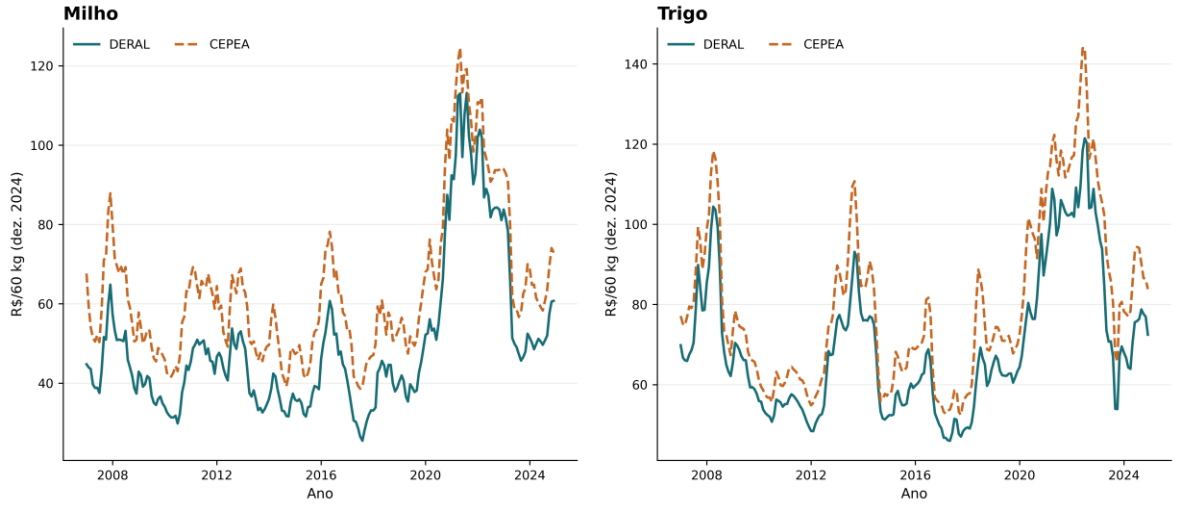
A correção monetária altera de modo substantivo a leitura histórica e permite comparar os extremos do período em uma mesma unidade de poder de compra. No DERAL, o milho apresentou média real de R$ 50,03 por saca de 60 kg, mediana de R$ 44,72 e coeficiente de variação de 38,22%. O trigo apresentou média de R$ 69,89, mediana de R$ 66,10 e CV de 25,26%. A maior dispersão relativa do milho decorre sobretudo da combinação entre o vale de 2017 e a elevação intensa observada entre 2020 e 2022.

Tabela 1 – Estatísticas descritivas dos preços reais mensais, 2007–2024

Cultura	Fonte	Média	Mediana	Mín.	Máx.	CV (%)
Milho	DERAL	50,03	44,72	25,47	113,15	38,22
Milho	CEPEA	63,54	58,95	38,60	124,60	29,78
Trigo	DERAL	69,89	66,10	46,00	121,44	25,26
Trigo	CEPEA	80,15	74,61	52,45	144,07	25,98

Fonte: Autoria própria. Valores em R$/saca de 60 kg, corrigidos pelo IPCA para dezembro de 2024, a partir de DERAL/SEAB-PR e CEPEA/ESALQ-USP.

Figura 1 – Preços reais mensais de milho e trigo segundo DERAL e CEPEA, 2007–2024



Fonte: Autoria própria, com dados DERAL/SEAB-PR, CEPEA/ESALQ-USP e IPCA/IBGE.

A Figura 1 mostra que as duas fontes reproduzem movimentos de grande escala semelhantes, mas não o mesmo nível de preço. Para milho, a diferença média CEPEA − DERAL foi de R$ 13,51/saca, equivalente a 29,97% quando expressa em relação ao DERAL. Para trigo, a diferença média foi de R$ 10,26/saca (14,55%). Em ambas as culturas, o valor CEPEA superou o DERAL nos 216 meses da amostra. As diferenças percentuais oscilaram entre 5,34% e 53,19% no milho e entre 4,86% e 35,25% no trigo.

A persistência do sinal não deve ser interpretada como evidência de erro de medição. O Indicador do Milho ESALQ/BM&FBovespa está associado a uma referência de mercado distinta do preço médio recebido pelo produtor paranaense; no trigo, embora ambas as séries estejam vinculadas ao Paraná, a especificação CEPEA diz respeito a trigo pão ou melhorador no mercado disponível, ao passo que o DERAL sintetiza o preço recebido pelo produtor. A literatura sobre integração espacial alerta justamente para o fato de que custos de transação

e diferenças de praça, qualidade e estágio comercial podem sustentar diferenciais entre preços relacionados (Ravallion, 1986; Fackler; Goodwin, 2001).

Os extremos reforçam a sincronização parcial entre as fontes. No milho, o mínimo real do DERAL ocorreu em agosto de 2017 (R$ 25,47), enquanto o mínimo CEPEA ocorreu em julho do mesmo ano (R$ 38,60). Os máximos concentraram-se em 2021: R$ 113,15 no DERAL em agosto e R$ 124,60 no CEPEA em maio. Para o trigo, os mínimos também se situaram em 2017, e ambas as fontes atingiram seus máximos em julho de 2022, com R$ 121,44 no DERAL e R$ 144,07 no CEPEA. A proximidade temporal desses pontos de inflexão indica que as séries compartilham movimentos de maior escala mesmo quando preservam diferenças persistentes de nível.

4.2. TENDÊNCIA E DISPERSÃO AO LONGO DO TEMPO

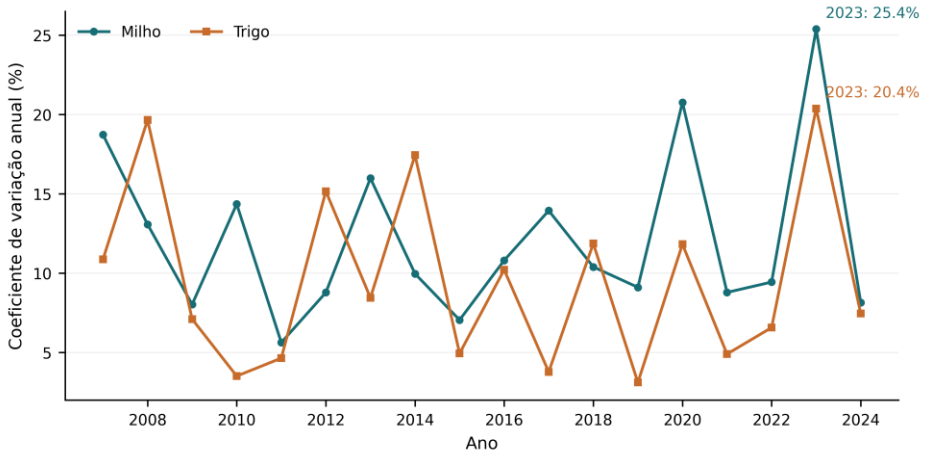
A regressão sobre médias anuais indicou inclinação positiva para as quatro séries, mas com baixo poder explicativo. No milho, a inclinação foi de R$ 1,79/saca ao ano no DERAL ($p = 0,027$; $R^2 = 0,270$) e R$ 1,58 no CEPEA ($p = 0,047$; $R^2 = 0,225$). Os intervalos de confiança de 95% permaneceram acima de zero. No trigo, as inclinações foram de R$ 1,09 no DERAL e R$ 1,50 no CEPEA, porém sem significância ao nível de 5%. Isso significa que uma reta captura apenas uma parcela limitada da trajetória: os saltos de 2008, 2013 e, sobretudo, 2020–2022 não são bem representados por crescimento linear uniforme.

Tabela 2 – Regressão linear das médias anuais reais em função do tempo

Cultura	Fonte	β_1 (R$/ano)	IC 95% de β_1	p	R^2
Milho	DERAL	1,792	0,232 a 3,353	0,027	0,270
Milho	CEPEA	1,575	0,026 a 3,124	0,047	0,225
Trigo	DERAL	1,086	−0,430 a 2,601	0,148	0,126
Trigo	CEPEA	1,498	−0,235 a 3,231	0,086	0,173

Fonte: Autoria própria. Modelo ajustado sobre 18 médias anuais (2007–2024) para cada combinação de cultura e fonte.

Figura 2 – Dispersão intra-anual dos preços reais recebidos pelo produtor no Paraná



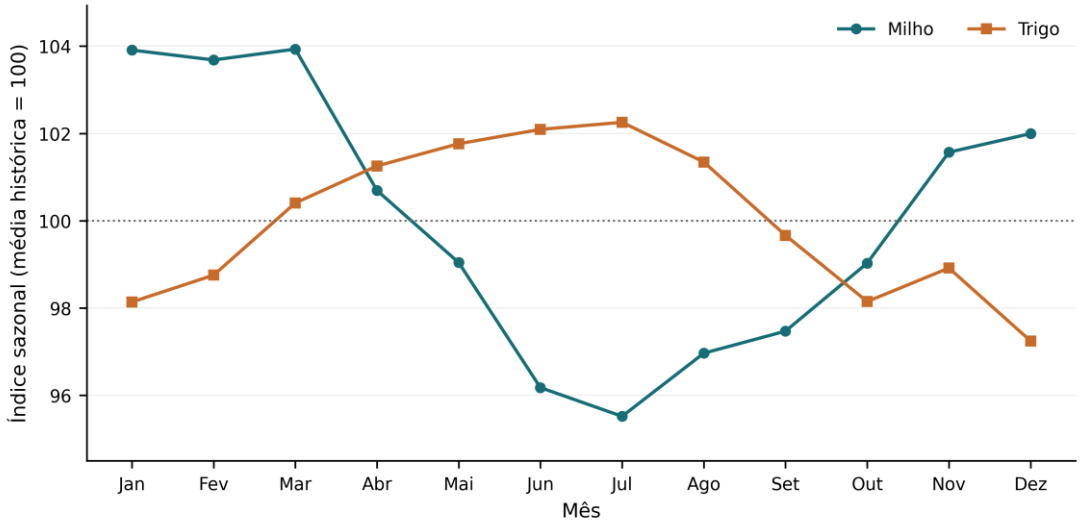
Fonte: Autoria própria, com dados DERAL/SEAB-PR corrigidos pelo IPCA/IBGE.

A dispersão dentro de cada ano também não foi constante (Figura 2). O maior CV anual do milho ocorreu em 2023, com 25,38%, ano em que o preço real caiu 37,38% entre janeiro e dezembro. Para o trigo, 2023 também apresentou o maior CV, 20,38%, acompanhado por redução de 30,21% no período anual. Em direção oposta, a maior elevação entre o início e o fim de um ano foi registrada em 2020 para milho (+55,57%) e em 2012 para trigo (+48,07%). Esses números mostram por que médias anuais isoladas podem ocultar trajetórias muito diferentes dentro do mesmo ano.

A sequência de forte alta em 2020–2022 e posterior recuo é compatível com a literatura que descreve preços de grãos como sensíveis à relação entre estoques, consumo e choques de oferta, com episódios de maior amplitude quando o sistema opera com menor folga física (Wright, 2011). O desenho deste trabalho não identifica as causas de cada movimento, mas a concentração temporal dos picos e dos maiores coeficientes de variação delimita períodos que merecem investigação econômica específica.

4.3. SAZONALIDADE E COMPONENTES STL

Figura 3 – Índice sazonal médio dos preços reais do DERAL por mês

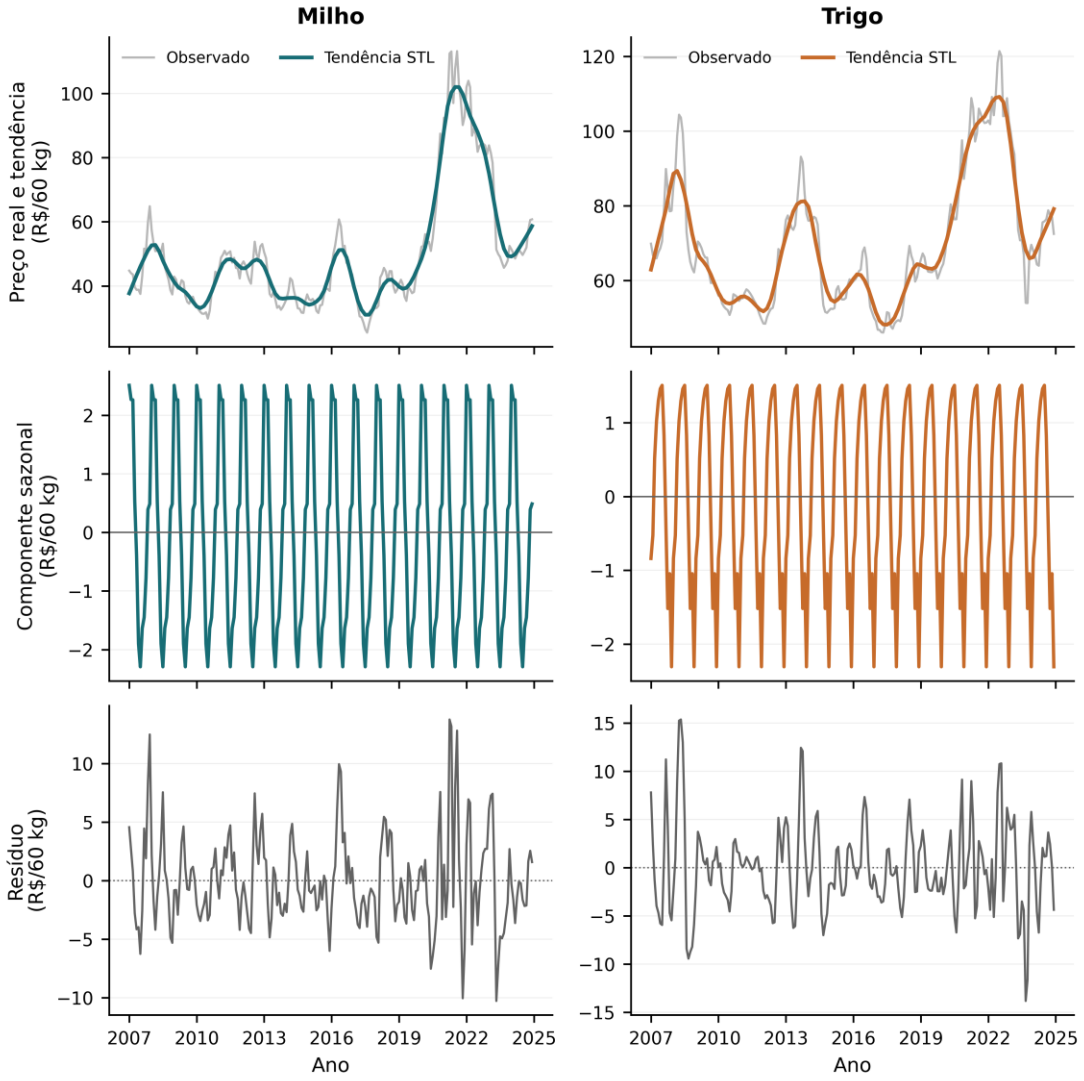


Fonte: Autoria própria, com dados DERAL/SEAB-PR corrigidos pelo IPCA/IBGE. Índice 100 = média histórica da cultura.

O milho exibiu um padrão sazonal mais pronunciado que o trigo. Os índices ficaram acima de 103 em janeiro, fevereiro e março, atingindo 103,93 em março, e recuaram para o menor valor em julho (95,52). A amplitude entre o maior e o menor índice foi de aproximadamente 8,41 pontos. O movimento médio sugere preços reais relativamente mais elevados no início do ano e mais baixos entre junho e agosto, com recuperação progressiva no último trimestre.

No trigo, o padrão foi mais plano. O maior índice ocorreu em julho (102,26) e o menor em dezembro (97,25), uma amplitude de cerca de 5,01 pontos. Entre abril e agosto, os índices permaneceram modestamente acima de 100; no final do ano, passaram a ficar abaixo da média histórica. A pequena amplitude é consistente com Melo e Moro (2013), que encontraram variações moderadas e estabilidade sazonal nos preços recebidos pelos produtores paranaenses de trigo. Para o milho, o contraste entre início e meio do ano também é compatível com a constatação de Melo (2021) de que a sazonalidade existe, porém sem desvios extremos em relação à média.

Figura 4 – Decomposição STL dos preços reais mensais do DERAL: tendência, sazonalidade e resíduo



Fonte: Autoria própria, com dados DERAL/SEAB-PR corrigidos pelo IPCA/IBGE.

A decomposição STL torna mais nítida a diferença entre movimento persistente e flutuação mensal. No milho, a tendência atingiu o mínimo em julho de 2017, em R$ 31,03/saca, e o máximo em julho de 2021, em R$ 102,00. No trigo, o mínimo também ocorreu em julho de 2017, em R$ 48,13, enquanto o máximo foi alcançado em julho de 2022, em R$ 109,19. Assim, o vale de 2017 aparece simultaneamente nas duas culturas, mas o pico tendencial do trigo ocorre aproximadamente um ano depois do milho.

O componente sazonal estimado pelo STL permanece pequeno diante das mudanças de tendência. Para milho, ele variou aproximadamente entre −R$ 2,29 em julho e +R$ 2,51 em janeiro; para trigo, entre −R$ 2,31 em dezembro e +R$ 1,51 em julho. Os maiores resíduos absolutos ocorreram em abril de 2021 para milho (+R$ 13,77) e maio de 2008 para trigo (+R$

15,35), pontos em que a observação se afastou do que tendência e sazonalidade periódica explicavam. A decomposição, portanto, confirma que a variação de longo prazo foi muito maior do que o padrão sazonal médio no horizonte analisado.

4.4. CLASSIFICAÇÃO DA DIREÇÃO MENSAL DOS PREÇOS

No conjunto de treinamento, a variação do mês anterior apresentou coeficiente positivo e estatisticamente diferente de zero nas quatro séries. O efeito foi mais intenso no trigo: uma elevação adicional de um ponto percentual na variação anterior esteve associada a razão de chances de aumento no mês corrente de 1,184 no CEPEA e 1,178 no DERAL. No milho, as razões de chances foram 1,058 e 1,078, respectivamente. A associação indica persistência direcional de curto prazo durante 2007–2021, mas a utilidade prática desse sinal depende do desempenho posterior, não apenas do p-valor do coeficiente.

Tabela 3 – Regressão logística direcional: coeficiente de treinamento e desempenho no teste

Cultura	Fonte	OR Δt−1	Acur. (%)	Sens. (%)	Espec. (%)
Milho	DERAL	1,078	66,67	52,94	78,95
Milho	CEPEA	1,058	63,89	53,33	71,43
Trigo	DERAL	1,178	58,33	33,33	76,19
Trigo	CEPEA	1,184	80,56	73,33	85,71

Fonte: Autoria própria. OR = razão de chances para aumento de 1 ponto percentual em Δt−1. Treinamento: 2007–2021 (n = 178 por série); teste: 2022–2024 (n = 36 por série).

A avaliação de 2022–2024 separou com clareza os comportamentos. O modelo CEPEA–trigo apresentou acurácia de 80,56%, sensibilidade de 73,33% e especificidade de 85,71%; sua matriz de confusão registrou 18 verdadeiros negativos, 3 falsos positivos, 4 falsos negativos e 11 verdadeiros positivos. No milho, as acurácias foram de 66,67% no DERAL e 63,89% no CEPEA, com sensibilidades próximas de 53%. O DERAL–trigo foi o caso mais fraco: 58,33% de acurácia e apenas 33,33% de sensibilidade, embora a especificidade tenha alcançado 76,19%.

Essa heterogeneidade é mais relevante que a escolha de um único número de acurácia. O mesmo preditor, aplicado à mesma cultura em fontes diferentes, pode preservar associação estatística no treinamento e ainda produzir capacidades distintas de identificar altas no período posterior. O resultado é coerente com a própria construção das séries: as fontes não observam exatamente o mesmo ponto do mercado. Como referência analítica, o classificador

mostra que a memória de uma defasagem contém informação útil em alguns casos, sobretudo no trigo CEPEA, mas não sustenta a ideia de uma regra universal para os dois produtos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de 2007 a 2024 mostrou que a interpretação dos preços de milho e trigo se torna mais consistente quando as séries são previamente harmonizadas e examinadas em diferentes escalas temporais. A correção pelo IPCA evitou confundir inflação com valorização dos produtos; a padronização para R$/60 kg permitiu confrontar as fontes; e a mineração descritiva revelou que CEPEA e DERAL preservaram movimentos amplos semelhantes, embora os níveis tenham permanecido sistematicamente distintos. Essa diferença é coerente com o fato de cada série representar uma referência de mercado própria e não deve ser tratada como simples divergência de qualidade dos dados.

Nos preços recebidos pelo produtor, o milho apresentou maior dispersão relativa do que o trigo. A sazonalidade média foi moderada nas duas culturas, mais marcada no milho, enquanto a decomposição STL mostrou que a principal transformação do período ocorreu na tendência, com vale comum em 2017 e picos posteriores em 2021 para milho e 2022 para trigo. As regressões anuais detectaram tendência linear positiva estatisticamente significativa apenas no milho, mas com R^2 baixo, confirmando que uma reta descreve somente parte da trajetória histórica.

O classificador logístico de uma defasagem cumpriu o papel de referência interpretável: o desempenho variou de 58,33% a 80,56% no teste cronológico e foi claramente dependente de fonte e cultura. Por construção, esse modelo não incorpora clima, estoques, câmbio, custos, produção ou outras variáveis exógenas e, portanto, não deve ser lido como sistema completo de previsão. Seu valor está em estabelecer uma linha de base reproduzível sobre a qual modelos mais ricos podem ser avaliados sem perder a transparência do processo.

Em conjunto, os resultados delineiam um quadro analítico baseado em integração de fontes, preços reais e decomposição temporal. Para aplicações de ciência de dados no agronegócio, a combinação é auditável e extensível: novas variáveis e modelos podem ser incorporados preservando a distinção entre observação, transformação estatística e inferência. Mais do que resumir cotações, a abordagem permite separar diferenças de referência, regularidades sazonais, movimentos de tendência e sinais direcionais de curto prazo em uma mesma base histórica.

REFERÊNCIAS

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. Indicador do Milho ESALQ/BM&FBovespa. Piracicaba: ESALQ/USP, 2026a. Disponível em: https://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/milho.aspx. Acesso em: 27 set. 2026.

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. Preço Médio do Trigo CEPEA/ESALQ – Paraná. Piracicaba: ESALQ/USP, 2026b. Disponível em: https://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/trigo.aspx. Acesso em: 27 set. 2026.

CLEVELAND, Robert B.; CLEVELAND, William S.; MCRAE, Jean E.; TERPENNING, Irma. STL: a seasonal-trend decomposition procedure based on Loess. Journal of Official Statistics, v. 6, n. 1, p. 3–73, 1990.

DEATON, Angus; LAROQUE, Guy. On the behaviour of commodity prices. The Review of Economic Studies, v. 59, n. 1, p. 1–23, 1992. DOI: 10.2307/2297923.

FACKLER, Paul L.; GOODWIN, Barry K. Spatial price analysis. In: GARDNER, Bruce L.; RAUSSER, Gordon C. (ed.). Handbook of Agricultural Economics. Amsterdam: Elsevier, 2001. v. 1B, p. 971–1024. DOI: 10.1016/S1574-0072(01)10025-3.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Tabela 1737: IPCA – série histórica com número-índice e variações. Rio de Janeiro: IBGE, 2026. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1737. Acesso em: 27 set. 2026.

MCCULLAGH, Peter; NELDER, John A. Generalized Linear Models. 2. ed. London: Chapman and Hall, 1989.

MELO, Cármem Ozana de. Modificação no padrão de comportamento dos preços do milho no Paraná em 2001–2019. Revista de Política Agrícola, v. 30, n. 1, p. 7–19, 2021.

MELO, Cármem Ozana de; MORO, Luciana. Sazonalidade de preços do trigo no Paraná de 2000 a 2012. Revista de Política Agrícola, v. 22, n. 4, p. 3–14, 2013.

PARANÁ. Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento. Departamento de Economia Rural. Relatórios de preços: preços recebidos pelo produtor. Curitiba: SEAB/DERAL, 2026. Disponível em: https://www.agricultura.pr.gov.br/deral/precos. Acesso em: 27 set. 2026.

RAVALLION, Martin. Testing market integration. American Journal of Agricultural Economics, v. 68, n. 1, p. 102–109, 1986. DOI: 10.2307/1241654.

SANTOS, Vladimir Faria dos; PEREIRA, Matheus Wemerson Gomes; BRAGA, Marcelo José; VIEIRA, Wilson da Cruz. Análise do preço do milho nos mercados externo e interno. Revista de Política Agrícola, v. 16, n. 3, p. 76–84, 2007.

SOUSA, Eliane Pinheiro de; BRAGA, Marcelo José; CUNHA, Dênis Antônio da. Interdependência dos preços do milho no sul brasileiro. Revista de Economia, v. 36, n. 2, 2010. DOI: 10.5380/re.v36i2.14289.

WORKING, Holbrook. The theory of price of storage. American Economic Review, v. 39, n. 6, p. 1254–1262, 1949.

WRIGHT, Brian D. The economics of grain price volatility. Applied Economic Perspectives and Policy, v. 33, n. 1, p. 32–58, 2011. DOI: 10.1093/aepp/ppq033.

CAPÍTULO XV

VALORIZAÇÃO DO BAGAÇO DE UVA: COMPOSIÇÃO CENTESIMAL E RESPOSTA ANTIOXIDANTE DE EXTRATOS DE DIFERENTES VARIEDADES

GRAPE POMACE VALORIZATION: PROXIMATE COMPOSITION AND ANTIOXIDANT RESPONSES OF EXTRACTS FROM FOUR CULTIVARS

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-15

Yasmin Andressa Silva de Aquino [1]
Raiana Almeida Carvalho Santos [1]
Ana Carolina da Silva [2]
Geoffroy Roger Pointer Malpass [3]
Mônica Hitomi Okura [2]
Ana Claudia Granato Malpass [3]

[1] Graduandas do curso de Engenharia de Alimentos. Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM
[2] Professoras do Departamento de Alimentos. Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM
[3] Professores Titulares do Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM

RESUMO

Este trabalho avaliou a composição centesimal de bagaços úmidos das variedades Arinto, Pinot Noir, Syrah e Merlot, bem como os teores de compostos fenólicos totais, flavonoides totais e a inibição do radical DPPH• em seus extratos. Os bagaços foram submetidos a cinco procedimentos de extração: mistura de metanol, etanol e água; água acidificada; ultrassom; micro-ondas; e Soxhlet. Syrah apresentou as maiores médias de umidade (62,10 g/100 g), lipídeos (11,70 g/100 g), proteínas (4,89 g/100 g) e fibra bruta (13,66 g/100 g). Pinot Noir apresentou a maior média de cinzas (17,33 g/100 g), enquanto Pinot Noir e Merlot integraram o grupo de maiores teores de carboidratos calculados por diferença. O Soxhlet proporcionou a maior recuperação de fenólicos e flavonoides totais nas quatro variedades, mas não produziu a maior inibição do DPPH• em todos os casos. Merlot apresentou as maiores médias de fenólicos e flavonoides nas extrações hidroalcoólica, com água acidificada, por ultrassom e por micro-ondas. Também apresentou a maior inibição do DPPH• nos três últimos procedimentos e integrou o grupo de maior resposta na extração hidroalcoólica. Considerando conjuntamente essas determinações, Merlot apresentou o desempenho mais consistente, e seu extrato hidroalcoólico reuniu elevados teores dos compostos avaliados e alta inibição do DPPH•. Os resultados mostram que a composição dos bagaços e as respostas dos extratos variaram entre as combinações de variedade e método de extração.

Palavras-chave: Bagaço de uva. Aproveitamento de resíduos. Compostos fenólicos. Flavonoides. Atividade antioxidante.

ABSTRACT

This study evaluated the proximate composition of wet grape pomace from the Arinto, Pinot Noir, Syrah, and Merlot varieties, as well as the total phenolic and flavonoid contents and DPPH• radical inhibition of their extracts. The pomace samples were subjected to five extraction procedures: a methanol, ethanol, and water mixture; acidified water; ultrasound; microwave; and Soxhlet extraction. Syrah had the highest mean moisture (62.10 g/100 g), lipid (11.70 g/100 g), protein (4.89 g/100 g), and crude fiber (13.66 g/100 g) contents. Pinot Noir had the highest mean ash content (17.33 g/100 g), while Pinot Noir and Merlot belonged to the group with the highest carbohydrate contents calculated by difference. Soxhlet extraction yielded the highest recovery of total phenolics and flavonoids in all four varieties, but did not produce the greatest DPPH• inhibition in every case. Merlot had the highest mean phenolic and flavonoid

contents following extraction with the methanol, ethanol, and water mixture, acidified water, ultrasound, and microwave. It also showed the greatest DPPH• inhibition with the latter three procedures and belonged to the highest response group with the methanol, ethanol, and water mixture. Across these measurements, Merlot showed the most consistent performance, and its extract obtained with the methanol, ethanol, and water mixture combined high levels of the measured compounds with high DPPH• inhibition. These findings show that pomace composition and extract responses varied across combinations of grape variety and extraction method.

Keywords: Grape pomace. By-product utilization. Phenolic compounds. Flavonoids. Antioxidant activity.

1. INTRODUÇÃO

A uva ocupa uma posição importante na produção mundial de frutas, tanto para consumo direto quanto para a fabricação de vinho, mostos e sucos. Em 2024, a produção global foi estimada em 77,7 milhões de toneladas de uvas frescas, das quais 33,3 milhões de toneladas disponíveis foram destinadas à prensagem (OIV, 2025). Esse processo gera bagaço, formado principalmente por cascas, sementes e porções de polpa. A quantidade produzida e suas características dependem da matéria-prima e das condições de processamento, mas a escala da produção de uvas torna relevante investigar formas de aproveitamento desse material.

Uma possibilidade é recuperar os compostos presentes no bagaço por meio de extração. As cascas e sementes da uva contêm diferentes classes de compostos fenólicos, cuja presença e concentração variam entre as partes da fruta. Peixoto et al. (2018), ao caracterizarem cascas, sementes e sua mistura, observaram diferenças no perfil fenólico e nas propriedades avaliadas. A obtenção de extratos permite estudar a fração recuperada nas condições experimentais escolhidas e avaliar sua atividade antioxidante in vitro. Entretanto, o extrato representa apenas parte dos constituintes do bagaço: sua composição depende tanto da matéria-prima quanto do procedimento empregado.

A variedade da uva pode influenciar os resultados. Em bagaços de cultivares tintas produzidas no Brasil, Rockenbach et al. (2011a) encontraram diferenças nos teores de compostos fenólicos e na atividade antioxidante. Xu et al. (2016) também observaram variações na composição fenólica e nas respostas aos ensaios DPPH e ABTS entre extratos de bagaço de quatro variedades. Assim, a caracterização de diferentes uvas é necessária para identificar a variabilidade das amostras estudadas, sem presumir que todos os bagaços apresentem o mesmo perfil químico ou a mesma resposta antioxidante.

Nesse contexto, medir a atividade antioxidante é uma etapa de caracterização, e não uma demonstração direta de benefício à saúde. Ensaios químicos permitem comparar a resposta dos extratos sob condições controladas; a interpretação nutricional ou fisiológica exige estudos adicionais sobre composição, digestão, metabolismo e efeitos biológicos. Ainda assim, reunir dados de composição química e atividade antioxidante de extratos obtidos de diferentes variedades de uva pode contribuir para selecionar matérias-primas e orientar pesquisas posteriores sobre o aproveitamento do bagaço.

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi obter extratos de bagaço de diferentes variedades de uva, caracterizar sua composição química e comparar sua atividade antioxidante in vitro.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. AMOSTRAS E OBTENÇÃO DOS EXTRATOS

Foram utilizadas uvas das variedades Arinto, Pinot Noir, Syrah e Merlot, cedidas por uma vinícola da cidade de Uberaba-MG. A uva da variedade Syrah foi cedida em setembro de 2024 e as demais variedades foram cedidas em janeiro de 2025. As variedades foram processadas separadamente. Na Vinícola as uvas passaram por um processo de lavagem e seleção. Em seguida foram prensadas e o material sólido remanescente foi recolhido como bagaço. O bagaço recolhido das quatro variedades supracitadas foi cedido para esse estudo. Todos os bagaços foram identificados e mantidos separados durante todas as etapas de preparo e análise.

Os extratos foram preparados separadamente a partir dos bagaços das variedades Arinto, Pinot Noir, Syrah e Merlot. Para cada variedade, foram empregadas extração com mistura de metanol, etanol e água, extração com água acidificada e extrações assistidas por ultrassom e micro-ondas e extração por Soxhlet.

Extração com metanol, etanol e água. Preparou-se inicialmente uma mistura de metanol e etanol na proporção 8:2 (v/v). Essa mistura foi combinada com água na proporção 1:1 (v/v), resultando no solvente utilizado na extração. Para cada variedade, 10 g de bagaço foram adicionados a 100 mL dessa mistura e mantidos por 16 h, à temperatura ambiente, ao abrigo da luz e sob agitação contínua. Em seguida, as amostras foram centrifugadas a 4.000 × g por 5 min, e os sobrenadantes foram recolhidos e armazenados a −3 °C até as análises. O procedimento foi adaptado de Gerardi et al. (2020).

Extração com água acidificada. Para cada variedade, 10 g de bagaço foram adicionados a 100 mL de água destilada acidificada com ácido cítrico, na concentração final de 0,001 mol/L. As amostras permaneceram por 16 h, à temperatura ambiente, ao abrigo da luz e sob agitação contínua. Após centrifugação a 4.000 × g por 5 min, os sobrenadantes foram recolhidos e armazenados a −3 °C até as análises. O procedimento foi adaptado de Gerardi et al. (2020).

Extração assistida por ultrassom. Para cada variedade, 10 g de bagaço foram adicionados a 200 mL da água acidificada descrita acima. As amostras foram submetidas a banho de ultrassom com frequência de 35 kHz e potência de 88 W, durante 15 min, à temperatura ambiente. Posteriormente, foram centrifugadas a 4.000 × g por 5 min, e os sobrenadantes foram recolhidos para as análises. O procedimento foi adaptado de Gerardi et al. (2020).

Extração assistida por micro-ondas. Para cada variedade, 10 g de bagaço foram adicionados a 200 mL da água acidificada descrita acima. As amostras foram submetidas à extração assistida por micro-ondas durante 60 min, com potência de 200 W e temperatura ajustada para 50 °C. Após o tratamento, foram centrifugadas a 4.000 × g por 5 min, e os sobrenadantes foram recolhidos para as análises. O procedimento foi adaptado de Drosou et al. (2015).

Extração por Soxhlet. Para cada variedade, 10 g de bagaço foram acondicionados em cartucho de extração. Utilizaram-se 500 mL de etanol no balão do equipamento, e a extração foi conduzida sob refluxo por 2 h. Ao término, o extrato foi recolhido para as análises. O procedimento foi adaptado de Drosou et al. (2015).

Após a separação do material sólido, os extratos obtidos com mistura hidroalcoólica e água acidificada foram completados para 200 mL com os respectivos solventes de extração. Os extratos obtidos por ultrassom e micro-ondas apresentaram volume final de 200 mL. Na extração por Soxhlet, embora tenham sido adicionados inicialmente 500 mL de etanol ao balão, o volume final do extrato recolhido medido foi de 400 mL. Para a expressão dos resultados por grama de bagaço, foram utilizados os volumes finais de 200 mL para os quatro primeiros procedimentos e de 400 mL para Soxhlet.

2.2. COMPOSIÇÃO CENTESIMAL

A composição centesimal dos bagaços foi determinada pela análise de umidade, proteínas, lipídeos, cinzas e fibras, segundo os métodos descritos pelo Instituto Adolfo Lutz (2008). Os resultados foram expressos em g por 100 g de bagaço em base úmida.

O teor de carboidratos foi calculado por diferença, a partir dos demais componentes da composição centesimal, todos expressos em g/100 g de bagaço na base úmida, conforme a equação: carboidratos (g/100 g) = 100 – (umidade + cinzas + lipídeos + proteínas + fibra bruta). Assim, o resultado corresponde à fração estimada por diferença, e não a uma determinação direta de carboidratos.

2.3. COMPOSTOS FENÓLICOS E FLAVONOIDES TOTAIS

O teor de compostos fenólicos totais foi determinado pelo método colorimétrico de Folin–Ciocalteu com base em Singleton, Orthofer e Lamuela-Raventós (1999). Em tubos de ensaio, foram adicionados 100 µL de amostra, padrão de ácido gálico ou branco, seguidos de 1,6 mL de água destilada e 100 µL do reagente de Folin–Ciocalteu. Após homogeneização em vórtex e incubação por 8 min, foram adicionados 200 µL de solução saturada de carbonato de sódio. A mistura foi homogeneizada e incubada por 10 min a 50 °C. A absorbância foi medida a 765 nm.

A curva de calibração foi preparada com ácido gálico nas concentrações de 10, 20, 50, 100 e 200 mg/L. Após a correção pelo branco e pelos fatores de diluição, os resultados foram calculados em mg EAG/g de bagaço.

O teor de flavonoides foi determinado pelo método de Jia, Tang e Wu (1999) com modificações. Foram misturados 0,5 mL da solução de amostra, 0,25 mL de solução de cloreto de alumínio a 5% e 4,25 mL de metanol. Após homogeneização, os tubos permaneceram 30 min no escuro, e a absorbância foi medida a 425 nm. O branco foi preparado substituindo a amostra pelo solvente empregado em sua preparação.

Foi utilizada uma curva de calibração de quercetina na faixa de 10 a 100 mg/L. As análises foram realizadas em triplicata e os resultados calculados como mg EQ/g de bagaço.

2.4. ENSAIO DPPH

A atividade antioxidante foi avaliada pela redução do radical DPPH, conforme procedimento baseado em Brand-Williams, Cuvelier e Berset (1995). A solução de DPPH foi preparada pela dissolução de 4,7 mg do reagente em metanol, completando-se o volume para

100 mL. Os extratos foram analisados sem diluição prévia. Para cada determinação, 0,3 mL de extrato foram misturados a 2,7 mL da solução de DPPH. Após homogeneização em vórtex, as misturas permaneceram por 30 min no escuro, à temperatura ambiente, e a absorbância foi medida a 517 nm.

Para cada solvente de extração, preparou-se um branco contendo 0,3 mL do solvente e 2,7 mL de metanol, sem DPPH. O controle continha 0,3 mL do mesmo solvente e 2,7 mL da solução de DPPH. As absorbâncias registradas para o extrato em reação com DPPH e para o controle foram subtraídas da absorbância do branco correspondente. A porcentagem de inibição foi calculada por I (%) = [(Acontrole − Aamostra) / Acontrole] × 100, utilizando-se os valores após essa subtração. Os extratos foram analisados em triplicata.

2.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados foram expressos como média ± desvio padrão de três determinações. Para cada componente da composição centesimal, as variedades foram comparadas entre si. Para compostos fenólicos totais, flavonoides totais e DPPH, foram realizadas comparações entre os métodos dentro de cada variedade e entre as variedades dentro de cada método. Cada conjunto de médias foi submetido separadamente à análise de variância (ANOVA) de uma via, seguida do teste de Tukey, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$). As análises foram realizadas no programa Statistica 10.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DO BAGAÇO

A composição centesimal dos bagaços úmidos das quatro variedades encontra-se na Tabela 1, em gramas por 100 g de amostra na base úmida. As letras representam as comparações entre variedades dentro de cada componente.

Tabela 1 – Composição centesimal dos bagaços úmidos (g/100 g de bagaço).

Componente	Arinto	Pinot Noir	Syrah	Merlot
Umidade	44,60 ± 0,36 [b]	34,24 ± 0,27 [c]	62,10 ± 0,74 [a]	34,77 ± 0,23 [c]
Cinzas	12,81 ± 0,24 [c]	17,33 ± 0,12 [a]	5,49 ± 0,11 [d]	14,05 ± 0,22 [b]
Lipídeos	8,32 ± 0,17 [b]	6,43 ± 0,06 [c]	11,70 ± 0,41 [a]	8,13 ± 0,36 [b]
Proteínas	2,91 ± 0,19 [b]	2,98 ± 0,31 [b]	4,89 ± 0,07 [a]	3,04 ± 0,30 [b]
Fibra bruta	9,27 ± 1,39 [b]	5,62 ± 2,04 [c]	13,66 ± 0,39 [a]	9,15 ± 0,49 [b]
Carboidratos por diferença	22,09 ± 0,88 [b]	33,40 ± 1,71 [a]	2,16 ± 0,84 [c]	30,86 ± 0,09 [a]

Fonte: Dados da pesquisa. Valores apresentados como média ± desvio padrão de três determinações. Em cada linha, médias que compartilham a mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As letras foram recalculadas a partir das determinações individuais fornecidas.

Syrah apresentou as maiores médias de umidade (62,10 g/100 g), lipídeos (11,70 g/100 g), proteínas (4,89 g/100 g) e fibra bruta (13,66 g/100 g). Pinot Noir apresentou a maior média de cinzas (17,33 g/100 g); Pinot Noir e Merlot formaram o grupo de maiores valores de carboidratos calculados por diferença, sem diferença significativa entre si. Os resultados expressos por 100 g de bagaço úmido refletem também as diferentes proporções de água presentes nas amostras.

Deamici et al. (2016) encontraram, em bagaço fermentado e úmido de Tannat, 63,61 g/100 g de umidade, 5,06 g/100 g de cinzas, 1,87 g/100 g de lipídeos e 18,37 g/100 g de fibra bruta. Comparados com Syrah, a umidade e as cinzas foram próximas, ao passo que os valores de lipídeos e fibra bruta diferiram. Jin et al. (2019) também descreveram variação da composição entre bagaços industriais de uvas brancas e tintas. As diferenças de variedade e processamento contextualizam o contraste entre esses resultados e os da Tabela 1.

3.2. COMPOSTOS FENÓLICOS TOTAIS

A Tabela 2 apresenta compostos fenólicos totais expressos por massa de bagaço úmido. As concentrações determinadas em mg EAG/L foram multiplicadas pelo volume final de cada extrato e divididas pelos 10 g de amostra utilizados. Letras minúsculas comparam variedades dentro de cada método; maiúsculas comparam métodos dentro de cada variedade.

Tabela 2 – Compostos fenólicos totais dos extratos (mg EAG/g de bagaço).

Variedade	Hidroalcoólico	Água acidificada	Ultrassom	Micro-ondas	Soxhlet
Arinto	0,830 ± 0,008 dB	0,654 ± 0,082 bB	0,444 ± 0,037 cB	0,449 ± 0,002 dB	8,752 ± 2,432 aA
Pinot Noir	1,491 ± 0,025 cB	0,849 ± 0,039 bB	0,541 ± 0,033 bB	0,766 ± 0,019 bB	8,804 ± 2,525 aA
Syrah	1,893 ± 0,069 bB	0,795 ± 0,101 bB	0,587 ± 0,018 bB	0,619 ± 0,033 cB	9,468 ± 2,775 aA
Merlot	3,073 ± 0,125 aB	2,291 ± 0,089 aB	1,320 ± 0,048 aB	1,718 ± 0,041 aB	7,443 ± 2,207 aA

Fonte: dados da pesquisa. Valores expressos como média ± desvio padrão de três determinações. Letras minúsculas comparam variedades dentro de cada coluna; letras maiúsculas comparam métodos dentro de cada linha. Médias que compartilham a mesma letra na comparação correspondente não diferem pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$).

A extração por Soxhlet apresentou as maiores médias em todas as variedades, entre 7,443 e 9,468 mg EAG/g de bagaço, diferindo dos outros métodos dentro de cada variedade. As quatro variedades não diferiram estatisticamente entre si no Soxhlet. Na extração hidroalcoólica, em água acidificada, por ultrassom e por micro-ondas, Merlot apresentou a maior média entre as variedades em cada método. Xu et al. (2016) e Rockenbach et al. (2011a) também observaram variação dos teores fenólicos recuperados entre bagaços de diferentes variedades; diferenças de método e de base de expressão impedem equiparar os valores absolutos aos aqui apresentados.

3.3. FLAVONOIDES TOTAIS

A Tabela 3 mostra os teores de flavonoides. As concentrações em mg EQ/L foram multiplicadas pelo volume final do extrato e divididas pelos 10 g de bagaço úmido empregados na extração. As letras representam comparações nas mesmas direções descritas na Tabela 2.

Merlot apresentou as maiores médias nas extrações hidroalcoólica, com água acidificada, por ultrassom e por micro-ondas. Em Soxhlet, Syrah obteve a maior média (8,772 mg EQ/g), seguida por Merlot (7,349 mg EQ/g), Pinot Noir (5,388 mg EQ/g) e Arinto (2,565 mg EQ/g), com diferença significativa entre as quatro variedades. Para cada variedade, Soxhlet superou significativamente os demais procedimentos; entre estes, as diferenças dependeram da amostra. Xu et al. (2016) também observaram variação de flavonoides entre variedades; Lazaridis et al. (2025) descreveram influência do solvente na extração de bagaços que incluíram Merlot e Syrah. Como os padrões analíticos e as unidades dos estudos diferem, essas

comparações dizem respeito ao comportamento das amostras, sem equivalência numérica direta.

Tabela 3 – Flavonoides totais dos extratos (mg EQ/g de bagaço).

Variedade	Hidroalcoólico	Água acidificada	Ultrassom	Micro-ondas	Soxhlet
Arinto	0,148 ± 0,003 cB	0,131 ± 0,003 cBc	0,098 ± 0,003 cCD	0,072 ± 0,003 cD	2,565 ± 0,049 dA
Pinot Noir	0,180 ± 0,010 cB	0,126 ± 0,009 cB	0,089 ± 0,006 cB	0,139 ± 0,009 bB	5,388 ± 0,197 cA
Syrah	0,469 ± 0,000 bB	0,187 ± 0,006 bB	0,146 ± 0,024 bB	0,124 ± 0,010 bB	8,772 ± 0,388 aA
Merlot	0,982 ± 0,061 aB	0,553 ± 0,011 aBc	0,191 ± 0,015 ac	0,360 ± 0,006 ac	7,349 ± 0,406 bA

Fonte: dados da pesquisa. Valores apresentados como média ± desvio padrão de três determinações. Letras minúsculas comparam variedades na mesma coluna; letras maiúsculas comparam métodos na mesma linha. Médias que compartilham ao menos uma letra na comparação correspondente não diferem pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$).

3.4. ATIVIDADE ANTIOXIDANTE PELO ENSAIO DPPH

A inibição do radical DPPH pelos extratos é apresentada na Tabela 4. Os percentuais dizem respeito aos extratos analisados sem diluição prévia; letras minúsculas comparam variedades por método e maiúsculas comparam métodos por variedade.

Na extração hidroalcoólica, Pinot Noir (91,95%), Syrah (89,33%) e Merlot (89,16%) formaram o grupo de maior resposta. Merlot apresentou a maior inibição com água acidificada (83,31%), ultrassom (44,81%) e micro-ondas (70,87%). Em Soxhlet, Arinto (88,87%) e Pinot Noir (88,75%) integraram o grupo de maiores valores. Dentro da variedade Merlot, a extração hidroalcoólica gerou a maior resposta por DPPH, ao passo que Soxhlet proporcionou os maiores teores de fenólicos e flavonoides. Assim, a ordenação dos extratos variou conforme a determinação.

Xu et al. (2016) encontraram respostas por DPPH distintas entre variedades; Rockenbach et al. (2011b) identificaram diferenças entre extratos de cascas e sementes, incluindo Pinot Noir. Esses estudos reforçam a relação da resposta com a matriz analisada; seus resultados, expressos por outras medidas, não podem ser diretamente confrontados com os percentuais da Tabela 4.

Tabela 4 – Inibição do radical DPPH pelos extratos de bagaço (%).

Variedade	Hidroalcoólico	Água acidificada	Ultrassom	Micro-ondas	Soxhlet
Arinto	35,27 ± 2,74 ^{bB}	4,18 ± 0,24 ^{dD}	4,07 ± 0,00 ^{dD}	8,75 ± 1,19 ^{dc}	88,87 ± 0,52 ^{aA}
Pinot Noir	91,95 ± 2,45 ^{aA}	19,25 ± 2,45 ^{bc}	11,60 ± 0,77 ^{cD}	29,69 ± 0,83 ^{bB}	88,75 ± 0,46 ^{aA}
Syrah	89,33 ± 0,35 ^{aA}	8,40 ± 1,20 ^{cE}	35,37 ± 2,81 ^{bc}	22,19 ± 1,75 ^{cD}	65,63 ± 0,32 ^{bB}
Merlot	89,16 ± 0,15 ^{aA}	83,31 ± 0,99 ^{aB}	44,81 ± 0,25 ^{aE}	70,87 ± 2,15 ^{ac}	49,22 ± 0,91 ^{cD}

Fonte: dados da pesquisa. Média ± desvio padrão de três determinações. Letras minúsculas comparam variedades na mesma coluna; letras maiúsculas comparam métodos na mesma linha. Médias que compartilham a mesma letra na comparação correspondente não diferem pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$).

Em conjunto, fenólicos totais, flavonoides totais e DPPH mostram que Merlot apresentou a resposta mais constante nos quatro métodos distintos de Soxhlet. Seu extrato hidroalcoólico reuniu valores elevados nas três determinações. A associação entre material e método também foi observada por Otero-Pareja et al. (2015): entre os bagaços que avaliaram, Merlot destacou-se na concentração de fenólicos, enquanto outra variedade apresentou a maior capacidade antioxidante. No presente estudo, Soxhlet ampliou os teores de fenólicos e flavonoides das quatro variedades, mas a liderança por DPPH nesse procedimento coube a Arinto e Pinot Noir.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os bagaços úmidos apresentaram perfis centesimais distintos. Syrah reuniu as maiores médias de umidade, lipídeos, proteínas e fibra bruta; Pinot Noir apresentou a maior média de cinzas. Nos extratos, Soxhlet proporcionou a maior recuperação de compostos fenólicos e flavonoides totais nas quatro variedades. Merlot apresentou as maiores médias dessas duas determinações nas extrações hidroalcoólica, com água acidificada, por ultrassom e por micro-ondas, e também a maior inibição por DPPH nos três últimos métodos. Consideradas as três determinações, a extração hidroalcoólica de Merlot reuniu elevados teores dos compostos avaliados e alta inibição do DPPH. A combinação de maior interesse depende da resposta que se deseja priorizar.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG, CAPES 001 e CNPq (Processos 313447/2021-7 e 303662/2025-5).

REFERÊNCIAS

BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT – Food Science and Technology, v. 28, n. 1, p. 25–30, 1995. DOI: 10.1016/S0023-6438(95)80008-5.

DEAMICI, Kricelle M.; OLIVEIRA, Lucas C. de; ROSA, Gabriela S. da; OLIVEIRA, Elizangela G. de. Drying kinetics of fermented grape pomace: determination of moisture effective diffusivity. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 20, n. 8, p. 763–768, 2016. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v20n8p763-768.

DROSOU, Christina; KYRIAKOPOULOU, Konstantina; BIMPILAS, Andreas; TSIMOGIANNIS, Dimitrios; KROKIDA, Magdalini. A comparative study on different extraction techniques to recover red grape pomace polyphenols from vinification byproducts. Industrial Crops and Products, v. 75, p. 141–149, 2015. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.05.063.

GERARDI, Carmela et al. Strategies for reuse of skins separated from grape pomace as ingredient of functional beverages. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, v. 8, artigo 645, 2020. DOI: 10.3389/fbioe.2020.00645.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Métodos físico-químicos para análise de alimentos. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. Disponível em: https://www.ial.sp.gov.br/ial/publicacoes/livros/metodos-fisico-quimicos-para-analise-de-alimentos. Acesso em: 24 set. 2026.

JIA, Zhishen; TANG, Mengcheng; WU, Jianming. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. Food Chemistry, v. 64, n. 4, p. 555–559, 1999. DOI: 10.1016/S0308-8146(98)00102-2.

JIN, Qing et al. Compositional characterization of different industrial white and red grape pomaces in Virginia and the potential valorization of the major components. Foods, v. 8, n. 12, art. 667, 2019. DOI: 10.3390/foods8120667.

LAZARIDIS, Dimitrios G. et al. A grape-derived solvent for the recovery of phenolic compounds from food waste by-products using ultrasonic-assisted and overnight extraction. Molecules, v. 30, n. 19, art. 3878, 2025. DOI: 10.3390/molecules30193878.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DA VINHA E DO VINHO (OIV). OIV statistical brief: wine, table grapes & dried grapes in 2024. Paris: OIV, set. 2025. Disponível em: https://www.oiv.int/sites/default/files/documents/OIV_Statistical_Brief-Wine_Table_Grapes_and_Dried_Grapes_in_2024.pdf. Acesso em: 23 set. 2026.

OTERO-PAREJA, María José; CASAS, Lourdes; FERNÁNDEZ-PONCE, María Teresa; MANTELL, Casimiro; MARTÍNEZ DE LA OSSA, Enrique J. Green extraction of antioxidants from different varieties of red grape pomace. Molecules, v. 20, n. 6, p. 9686–9702, 2015. DOI: 10.3390/molecules20069686.

PEIXOTO, Carla M. et al. Grape pomace as a source of phenolic compounds and diverse bioactive properties. Food Chemistry, v. 253, p. 132–138, 2018. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.01.163.

ROCKENBACH, Ismael Ivan; RODRIGUES, Eliseu; GONZAGA, Luciano Valdemiro; CALIARI, Vinícius; GENOVESE, Maria Inés; GONÇALVES, Any Elisa de Souza Schmidt; FETT, Roseane. Phenolic compounds content and antioxidant activity in pomace from selected red grapes (Vitis vinifera L. and Vitis labrusca L.) widely produced in Brazil. Food Chemistry, v. 127, n. 1, p. 174–179, 2011a. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.12.137.

ROCKENBACH, Ismael Ivan; GONZAGA, Luciano Valdemiro; RIZELIO, Viviane Maria; GONÇALVES, Any Elisa de Souza Schmidt; GENOVESE, Maria Inés; FETT, Roseane. Phenolic compounds and antioxidant activity of seed and skin extracts of red grape (Vitis vinifera and Vitis labrusca) pomace from Brazilian winemaking. Food Research International, v. 44, n. 4, p. 897–901, 2011b. DOI: 10.1016/j.foodres.2011.01.049.

SINGLETON, Vernon L.; ORTHOFER, Rudolf; LAMUELA-RAVENTÓS, Rosa M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. Methods in Enzymology, v. 299, p. 152–178, 1999. DOI: 10.1016/S0076-6879(99)99017-1.

XU, Yixiang et al. Phenolic compounds, antioxidant, and antibacterial properties of pomace extracts from four Virginia-grown grape varieties. Food Science & Nutrition, v. 4, n. 1, p. 125–133, 2016. DOI: 10.1002/fsn3.264

CAPÍTULO XVI

DO BAGAÇO À FARINHA: COMPOSIÇÃO E RESPOSTAS ANTIOXIDANTES DE QUATRO VARIEDADES DE UVA

FROM GRAPE POMACE TO FLOUR: COMPOSITION AND ANTIOXIDANT RESPONSES OF FOUR GRAPE CULTIVARS

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-16

Raiana Almeida Carvalho Santos [1]
Yasmin Andressa Silva de Aquino [1]
Ana Carolina da Silva [2]
Geoffroy Roger Pointer Malpass [3]
Mônica Hitomi Okura [2]
Ana Claudia Granato Malpass [3]

[1] Graduandas do curso de Engenharia de Alimentos. Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM
[2] Professoras do Departamento de Alimentos. Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM
[3] Professores Titulares do Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM

RESUMO

Este trabalho avaliou a composição centesimal de farinhas obtidas de bagaços das uvas Arinto, Pinot Noir, Syrah e Merlot, bem como os teores de compostos fenólicos totais, flavonoides totais e a inibição do radical DPPH em seus extratos. Foram empregadas extrações hidroalcoólica, com água acidificada, por ultrassom, por micro-ondas e por Soxhlet. Syrah apresentou os maiores teores de proteínas (12,42 g/100 g) e fibra bruta (16,70 g/100 g), enquanto Merlot apresentou o maior teor de carboidratos (63,65 g/100 g). Soxhlet proporcionou os maiores teores de fenólicos e flavonoides totais por grama de farinha nas quatro variedades. Nesse procedimento, Arinto e Pinot Noir integraram o grupo de maiores médias de fenólicos totais; Syrah apresentou a maior média de flavonoides totais (6,168 mg EQ/g). A maior inibição numérica do DPPH ocorreu em Pinot Noir extraída por Soxhlet (93,34%), sem diferir da resposta obtida por ultrassom. Para Syrah, a maior inibição ocorreu com micro-ondas; para Merlot, com ultrassom e micro-ondas. Nenhuma combinação de variedade e método liderou todas as determinações avaliadas.

Palavras-chave: Farinha de bagaço de uva. Aproveitamento de resíduos. Compostos fenólicos. Flavonoides. Atividade antioxidante..

ABSTRACT

This study assessed the proximate composition of grape pomace flours from Arinto, Pinot Noir, Syrah, and Merlot and measured total phenolics, total flavonoids, and DPPH radical inhibition in their extracts. Hydroalcoholic, acidified water, ultrasound, microwave, and Soxhlet extraction were used. Syrah flour had the highest protein (12.42 g/100 g) and crude fiber (16.70 g/100 g) contents, whereas Merlot flour had the highest carbohydrate content (63.65 g/100 g). Soxhlet extraction yielded the highest total phenolic and flavonoid contents per gram of flour for all four cultivars. With this method, Arinto and Pinot Noir belonged to the highest total phenolics group, while Syrah had the highest total flavonoid content (6.168 mg quercetin equivalents/g). The highest numerical DPPH inhibition was obtained from the Soxhlet extract of Pinot Noir (93.34%), which did not differ from its ultrasound extract. Microwave extraction yielded the highest DPPH inhibition for Syrah; ultrasound and microwave extraction produced the highest responses for Merlot. No cultivar–extraction combination ranked first across all measurements.

Keywords: Grape pomace flour. By-product valorization. Phenolic compounds. Flavonoids. Antioxidant activity.

1. INTRODUÇÃO

A produção de uvas atende tanto ao consumo da fruta fresca quanto à fabricação de vinho, mostos, sucos e outros derivados. Segundo a Organização Internacional da Vinha e do Vinho, foram produzidas 77,7 milhões de toneladas de uvas frescas no mundo em 2024; do volume disponível para utilização, 33,3 milhões de toneladas foram destinadas à prensagem (OIV, 2025). Após esse processo, permanece um material sólido composto principalmente por cascas, sementes e porções de polpa. O aproveitamento desse bagaço merece atenção pela quantidade gerada e pela presença de constituintes que podem ser preservados em produtos obtidos a partir dele.

A secagem e a moagem do bagaço permitem obter uma farinha na qual permanecem diferentes componentes da matéria-prima. Sua composição centesimal, incluindo umidade, proteínas, lipídeos, cinzas, fibras e carboidratos, fornece uma primeira descrição de suas características nutricionais e ajuda a avaliar possibilidades de utilização. Em farinha produzida a partir de bagaço brasileiro da cultivar Pinot noir, Beres et al. (2016) identificaram uma proporção expressiva de fibra alimentar, além de proteínas, lipídeos e outros constituintes. Esses valores, contudo, descrevem o material e as condições daquele estudo; não devem ser atribuídos automaticamente a farinhas obtidas de outras variedades.

Além das fibras, o bagaço pode conter compostos fenólicos presentes nas cascas e sementes da uva. O interesse por esses compostos está relacionado, entre outras propriedades, à resposta que apresentam em ensaios de atividade antioxidante. A farinha é especialmente interessante porque mantém a matriz sólida, na qual parte dos compostos fenólicos pode permanecer associada às fibras. Assim, estudar a farinha permite considerar características que não são descritas apenas pela análise de um extrato obtido do bagaço (Beres et al., 2016; Peixoto et al., 2018).

A variedade da uva pode influenciar a composição e a atividade antioxidante da farinha. Rockenbach et al. (2011a) observaram diferenças no teor de compostos fenólicos e na atividade antioxidante de bagaços de cultivares produzidas no Brasil. Em estudo específico com farinhas de bagaço, Monteiro et al. (2021) também encontraram variações entre as amostras avaliadas; a farinha produzida exclusivamente com a cultivar Niagara Rosada, por exemplo, apresentou os menores valores de compostos fenólicos e capacidade antioxidante

entre as preparações daquele trabalho. Esses resultados reforçam a necessidade de caracterizar cada farinha obtida, considerando as variedades e o processamento empregados.

Nesse contexto, conhecer a composição centesimal e a atividade antioxidante in vitro de farinhas produzidas com diferentes variedades de uva é um passo para avaliar seu potencial de aproveitamento. Essas análises permitem comparar as farinhas e identificar características de interesse para estudos posteriores sobre aplicações alimentares. O objetivo deste trabalho foi produzir farinhas de bagaço de diferentes variedades de uva, determinar sua composição centesimal e comparar sua atividade antioxidante in vitro.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. AMOSTRAS, FARINHA E EXTRATOS

Foram utilizadas uvas das variedades Arinto, Pinot Noir, Syrah e Merlot, cedidas por uma vinícola da cidade de Uberaba-MG. A uva da variedade Syrah foi cedida em setembro de 2024 e as demais variedades foram cedidas em janeiro de 2025. As variedades foram processadas separadamente. Na Vinícola as uvas passaram por um processo de lavagem e seleção. Em seguida foram prensadas e o material sólido remanescente foi recolhido como bagaço. O bagaço recolhido das quatro variedades supracitadas foi cedido para esse estudo. Todos os bagaços foram identificados e mantidos separados durante todas as etapas de preparo e análise.

O bagaço de cada variedade foi pesado e distribuído em bandeja de inox. As amostras foram secas em estufa com circulação de ar a 70 °C por 2 h. Após o resfriamento, o material seco foi triturado em moinho de facas. As farinhas foram acondicionadas em recipientes de vidro âmbar e armazenadas sob refrigeração até as análises.

Os extratos foram preparados separadamente a partir das farinhas de bagaço das variedades Arinto, Pinot Noir, Syrah e Merlot. Para cada variedade, foram empregadas extração com mistura de metanol, etanol e água, extração com água acidificada e extrações assistidas por ultrassom e micro-ondas e extração por Soxhlet.

Extração com metanol, etanol e água. Preparou-se inicialmente uma mistura de metanol e etanol na proporção 8:2 (v/v). Essa mistura foi combinada com água na proporção 1:1 (v/v), resultando no solvente utilizado na extração. Para cada variedade, 10 g de farinha de bagaço foram adicionados a 100 mL dessa mistura e mantidos por 16 h, à temperatura ambiente, ao abrigo da luz e sob agitação contínua. Em seguida, as amostras foram

centrifugadas a 4.000 × g por 5 min, e os sobrenadantes foram recolhidos e armazenados a −3 °C até as análises. O procedimento foi adaptado de Gerardi et al. (2020).

Extração com água acidificada. Para cada variedade, 10 g de farinha de bagaço foram adicionados a 100 mL de água destilada acidificada com ácido cítrico, na concentração final de 0,001 mol/L. As amostras permaneceram por 16 h, à temperatura ambiente, ao abrigo da luz e sob agitação contínua. Após centrifugação a 4.000 × g por 5 min, os sobrenadantes foram recolhidos e armazenados a −3 °C até as análises. O procedimento foi adaptado de Gerardi et al. (2020).

Extração assistida por ultrassom. Para cada variedade, 10 g de farinha de bagaço foram adicionados a 200 mL da água acidificada descrita acima. As amostras foram submetidas a banho de ultrassom com frequência de 35 kHz e potência de 88 W, durante 15 min, à temperatura ambiente. Posteriormente, foram centrifugadas a 4.000 × g por 5 min, e os sobrenadantes foram recolhidos para as análises. O procedimento foi adaptado de Gerardi et al. (2020).

Extração assistida por micro-ondas. Para cada variedade, 10 g de farinha de bagaço foram adicionados a 200 mL da água acidificada descrita acima. As amostras foram submetidas à extração assistida por micro-ondas durante 60 min, com potência de 200 W e temperatura ajustada para 50 °C. Após o tratamento, foram centrifugadas a 4.000 × g por 5 min, e os sobrenadantes foram recolhidos para as análises. O procedimento foi adaptado de Drosou et al. (2015).

Extração por Soxhlet. Para cada variedade, 10 g de farinha de bagaço foram acondicionados em cartucho de extração. Utilizaram-se 500 mL de etanol no balão do equipamento, e a extração foi conduzida sob refluxo por 2 h. Ao término, o extrato foi recolhido para as análises. O procedimento foi adaptado de Drosou et al. (2015).

Após a separação do material sólido, os extratos obtidos com mistura hidroalcoólica e água acidificada foram completados para 200 mL com os respectivos solventes de extração. Os extratos obtidos por ultrassom e micro-ondas apresentaram volume final de 200 mL. Na extração por Soxhlet, embora tenham sido adicionados inicialmente 500 mL de etanol ao balão, o volume final do extrato recolhido medido foi de 400 mL. Para a expressão dos resultados por grama de farinha, foram utilizados os volumes finais de 200 mL para os quatro primeiros procedimentos e de 400 mL para Soxhlet.

2.2. COMPOSIÇÃO CENTESIMAL

A composição centesimal das farinhas foi determinada pela análise de umidade, proteínas, lipídeos, cinzas e fibras, segundo os métodos descritos pelo Instituto Adolfo Lutz (2008). Os resultados foram expressos em g por 100 g de farinha em base úmida.

O teor de carboidratos foi calculado por diferença, a partir dos demais componentes da composição centesimal, todos expressos em g/100 g de farinha na base úmida, conforme a equação: carboidratos (g/100 g) = 100 – (umidade + cinzas + lipídeos + proteínas + fibra bruta). Assim, o resultado corresponde à fração estimada por diferença, e não a uma determinação direta de carboidratos.

2.3. COMPOSTOS FENÓLICOS E FLAVONOIDES TOTAIS

O teor de compostos fenólicos totais foi determinado pelo método colorimétrico de Folin–Ciocalteu com base em Singleton, Orthofer e Lamuela-Raventós (1999). Em tubos de ensaio, foram adicionados 100 µL de amostra, padrão de ácido gálico ou branco, seguidos de 1,6 mL de água destilada e 100 µL do reagente de Folin–Ciocalteu. Após homogeneização em vórtex e incubação por 8 min, foram adicionados 200 µL de solução saturada de carbonato de sódio. A mistura foi homogeneizada e incubada por 10 min a 50 °C. A absorbância foi medida a 765 nm.

A curva de calibração foi preparada com ácido gálico nas concentrações de 10, 20, 50, 100 e 200 mg/L. Após a correção pelo branco e pelos fatores de diluição, os resultados foram calculados em mg EAG/g de farinha.

O teor de flavonoides foi determinado pelo método de Jia, Tang e Wu (1999) com modificações. Foram misturados 0,5 mL da solução de amostra, 0,25 mL de solução de cloreto de alumínio a 5% e 4,25 mL de metanol. Após homogeneização, os tubos permaneceram 30 min no escuro, e a absorbância foi medida a 425 nm. O branco foi preparado substituindo a amostra pelo solvente empregado em sua preparação.

Foi utilizada uma curva de calibração de quercetina na faixa de 10 a 100 mg/L. As análises foram realizadas em triplicata e os resultados calculados como mg EQ/g de farinha.

2.4. ATIVIDADE ANTIOXIDANTE PELO ENSAIO DPPH

A atividade antioxidante foi avaliada pela redução do radical DPPH, conforme procedimento baseado em Brand-Williams, Cuvelier e Berset (1995). A solução de DPPH foi preparada pela dissolução de 4,7 mg do reagente em metanol, completando-se o volume para

100 mL. Os extratos foram analisados sem diluição prévia. Para cada determinação, 0,3 mL de extrato foram misturados a 2,7 mL da solução de DPPH. Após homogeneização em vórtex, as misturas permaneceram por 30 min no escuro, à temperatura ambiente, e a absorbância foi medida a 517 nm.

Para cada solvente de extração, preparou-se um branco contendo 0,3 mL do solvente e 2,7 mL de metanol, sem DPPH. O controle continha 0,3 mL do mesmo solvente e 2,7 mL da solução de DPPH. As absorbâncias registradas para o extrato em reação com DPPH e para o controle foram subtraídas da absorbância do branco correspondente. A porcentagem de inibição foi calculada por I (%) = [(Acontrole − Aamostra) / Acontrole] × 100, utilizando-se os valores após essa subtração. Os extratos foram analisados em triplicata.

2.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados foram expressos como média ± desvio padrão de três determinações. Para cada componente da composição centesimal, as variedades foram comparadas entre si. Para compostos fenólicos totais, flavonoides totais e DPPH, foram realizadas comparações entre métodos dentro de cada variedade e entre variedades dentro de cada método. Cada conjunto de médias foi submetido separadamente à análise de variância (ANOVA) de uma via, seguida do teste de Tukey, com nível de significância de 5% ($p < 0,05$). As análises foram realizadas no programa Statistica 10.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DAS FARINHAS

A Tabela 1 apresenta a composição das farinhas de Arinto, Pinot Noir, Syrah e Merlot na base úmida. As letras comparam variedades para cada componente.

Tabela 1 – Composição centesimal das farinhas de bagaço de uva (g/100 g de farinha).

	Arinto	Pinot Noir	Syrah	Merlot
Umidade	5,65 ± 0,32 ^{b}	5,73 ± 0,36 ^{b}	12,83 ± 0,30 ^{a}	5,89 ± 0,20 ^{b}
Cinzas	10,77 ± 0,38 ^{a}	10,08 ± 0,31 ^{ab}	9,46 ± 0,21 ^{bc}	9,15 ± 0,17 ^{c}
Lipídeos	5,39 ± 0,29 ^{b}	4,00 ± 0,15 ^{c}	8,27 ± 0,04 ^{a}	5,03 ± 0,21 ^{b}
Proteínas	6,33 ± 0,43 ^{c}	7,91 ± 0,46 ^{b}	12,42 ± 0,64 ^{a}	7,17 ± 0,15 ^{bc}
Fibra bruta	13,21 ± 1,53 ^{b}	11,45 ± 1,89 ^{bc}	16,70 ± 0,32 ^{a}	9,10 ± 0,48 ^{c}
Carboidratos	58,65 ± 0,35 ^{b}	60,83 ± 1,76 ^{b}	40,32 ± 0,51 ^{c}	63,65 ± 0,73 ^{a}

Fonte: Dados da pesquisa. Valores apresentados como média ± desvio padrão de três determinações. Em cada linha, médias que compartilham ao menos uma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Syrah apresentou as maiores médias de umidade (12,83 g/100 g), lipídeos (8,27 g/100 g), proteínas (12,42 g/100 g) e fibra bruta (16,70 g/100 g). Merlot apresentou a maior média de carboidratos (63,65 g/100 g); Arinto, a maior de cinzas (10,77 g/100 g). As diferenças de letras da Tabela 1 detalham quais cultivares diferiram em cada componente.

Sousa et al. (2014) encontraram na farinha de Benitaka 3,33 g/100 g de umidade, 4,65 g/100 g de cinzas, 8,16 g/100 g de lipídeos e 8,49 g/100 g de proteínas. Beres et al. (2016) relataram para farinha de Pinot Noir 13,80 g/100 g de proteínas, 4,21 g/100 g de lipídeos e 5,55 g/100 g de cinzas; na farinha de Pinot Noir deste estudo, os valores foram 7,91, 4,00 e 10,08 g/100 g, respectivamente. Para bagaço desidratado de Vinhão, Machado et al. (2024) descreveram 3,43 g/100 g de umidade, 8,20 g/100 g de cinzas e 3,38 g/100 g de lipídeos. Essas diferenças são compatíveis com a diversidade dos materiais e processos de obtenção.

A fibra bruta determinada neste estudo variou de 9,10 g/100 g, em Merlot, a 16,70 g/100 g, em Syrah. Sousa et al. (2014), Beres et al. (2016) e Machado et al. (2024) determinaram fibra alimentar total, grandeza analítica distinta, cujos valores não devem ser equiparados diretamente aos de fibra bruta.

3.2. COMPOSTOS FENÓLICOS TOTAIS

A Tabela 2 reúne os resultados de Folin–Ciocalteu. A concentração de cada extrato, expressa em mg EAG/L, foi multiplicada por seu volume final e dividida pela massa de 10 g de farinha, obtendo-se mg EAG/g de farinha. Letras minúsculas comparam variedades em cada método; letras maiúsculas comparam métodos em cada variedade.

Tabela 2 – Compostos fenólicos totais dos extratos (mg EAG/g de farinha).

Variedade	Mistura hidroalcoólica	Água acidificada	Ultrassom	Micro-ondas	Soxhlet
Arinto	4,61 ± 0,26 ^{aB}	4,26 ± 1,23 ^{aB}	3,80 ± 0,05 ^{bB}	2,53 ± 0,09 ^{bB}	48,73 ± 5,24 ^{aA}
Pinot Noir	4,47 ± 0,13 ^{aB}	4,24 ± 1,44 ^{aB}	4,82 ± 0,26 ^{aB}	4,13 ± 0,09 ^{aB}	45,30 ± 2,57 ^{aA}
Syrah	4,54 ± 0,24 ^{aB}	3,23 ± 0,95 ^{aB}	2,66 ± 0,12 ^{cB}	1,92 ± 0,03 ^{cB}	32,72 ± 3,84 ^{bA}
Merlot	4,31 ± 0,16 ^{aB}	4,11 ± 1,46 ^{aB}	4,96 ± 0,07 ^{aB}	3,96 ± 0,24 ^{aB}	22,52 ± 1,83 ^{cA}

Fonte: Dados da pesquisa. Valores apresentados como média ± desvio padrão de três determinações. Letras minúsculas comparam variedades dentro da mesma coluna; letras maiúsculas comparam métodos dentro da mesma linha. Valores que compartilham uma letra na comparação pertinente não diferem pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Soxhlet produziu as maiores médias nas quatro variedades: Arinto 48,73; Pinot Noir 45,30; Syrah 32,72; e Merlot 22,52 mg EAG/g. Dentro de cada variedade, essas médias

diferiram das obtidas pelos quatro outros métodos, que não diferiram entre si. Arinto e Pinot Noir formaram o grupo de maiores respostas por Soxhlet. Sob ultrassom e micro-ondas, Pinot Noir e Merlot apresentaram as maiores médias. Drosou et al. (2015) também descreveram variação na recuperação de polifenóis de bagaço de uva conforme a técnica de extração; as diferenças de solventes e condições de processo limitam a comparação numérica direta.

3.3. FLAVONOIDES TOTAIS

A Tabela 3 apresenta flavonoides expressos por grama de farinha, após multiplicação das concentrações em mg EQ/L pelo volume final de cada extrato e divisão pelos 10 g de farinha extraídos. As letras indicam as duas direções de comparação estatística descritas na Tabela 2.

Soxhlet apresentou as maiores médias nas quatro variedades e diferiu dos demais métodos em cada uma delas. Nesse procedimento, Syrah atingiu 6,168 mg EQ/g, seguida de Merlot (3,505 mg EQ/g), Pinot Noir (2,926 mg EQ/g) e Arinto (2,190 mg EQ/g), com diferenças significativas entre as quatro. Na mistura hidroalcoólica, Syrah também apresentou a maior média (2,311 mg EQ/g); em água acidificada e micro-ondas, Merlot ocupou a primeira posição, e, sob ultrassom, Pinot Noir (0,826 mg EQ/g).

Tabela 3 – Flavonoides totais dos extratos (mg EQ/g de farinha).

Variedade	Mistura hidroalcoólica	Água acidificada	Ultrassom	Micro-ondas	Soxhlet
Arinto	0,928 ± 0,020 cB	0,458 ± 0,000 ac	0,196 ± 0,010 aD	0,360 ± 0,031 acD	2,190 ± 0,156 dA
Pinot Noir	0,766 ± 0,041 dBc	0,566 ± 0,003 cD	0,826 ± 0,017 bB	0,402 ± 0,020 aD	2,926 ± 0,196 cA
Syrah	2,311 ± 0,043 aB	0,441 ± 0,031 ac	0,241 ± 0,020 aD	0,256 ± 0,023 cD	6,168 ± 0,053 aA
Merlot	2,061 ± 0,042 bB	1,000 ± 0,012 bc	0,462 ± 0,021 cD	0,648 ± 0,022 bD	3,505 ± 0,190 bA

Fonte: Dados da pesquisa. Valores expressos como média ± desvio padrão de três determinações. Letras minúsculas comparam variedades dentro de cada coluna; letras maiúsculas comparam métodos dentro de cada linha. Médias que compartilham ao menos uma letra na comparação correspondente não diferem pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Drosou et al. (2015) e Carpentieri, Ferrari e Pataro (2023) relataram influência das condições de extração na recuperação de compostos do bagaço. Neste estudo, embora Soxhlet tenha apresentado as maiores médias de ambas as determinações, a liderança por

cultivar diferiu: Arinto e Pinot Noir apresentaram as maiores médias de fenólicos totais por Soxhlet, ao passo que Syrah apresentou a maior média de flavonoides totais nesse método.

3.4. ATIVIDADE ANTIOXIDANTE PELO ENSAIO DPPH

A Tabela 4 mostra o percentual de inibição do radical DPPH dos extratos analisados sem diluição prévia. Os valores descrevem a resposta produzida pelo volume de 0,3 mL de extrato utilizado em cada reação; as letras representam as comparações entre variedades e métodos.

Pinot Noir extraída por Soxhlet apresentou a maior média numérica da tabela (93,34%), sem diferir do ultrassom (91,12%). Arinto exibiu 92,18% em Soxhlet e 90,68% sob ultrassom, ambos no mesmo grupo de sua variedade. Para Syrah, a maior resposta ocorreu com micro-ondas (90,71%); em Merlot, com ultrassom (85,79%) e micro-ondas (85,02%), sem diferença entre eles. Soxhlet apresentou a menor resposta de Merlot, 43,13%, embora tenha produzido nessa variedade a maior média de fenólicos e flavonoides por grama de farinha.

Tabela 4 – Inibição do radical DPPH pelos extratos (%).

Variedade	Mistura hidroalcoólica	Água acidificada	Ultrassom	Micro-ondas	Soxhlet
Arinto	86,76 ± 0,34 ^{aA}	68,04 ± 4,81 ^{bB}	90,68 ± 0,05 ^{aA}	87,25 ± 0,59 ^{bA}	92,18 ± 0,21 ^{aA}
Pinot Noir	88,33 ± 0,71 ^{aB}	73,12 ± 1,93 ^{abD}	91,12 ± 1,46 ^{aAB}	82,68 ± 0,15 ^{c}c	93,34 ± 0,14 ^{aA}
Syrah	73,97 ± 0,99 ^{bc}	78,87 ± 0,32 ^{aB}	65,78 ± 0,80 ^{cD}	90,71 ± 0,59 ^{aA}	79,77 ± 1,27 ^{bB}
Merlot	71,58 ± 1,24 ^{cB}	75,13 ± 0,87 ^{aB}	85,79 ± 0,76 ^{bA}	85,02 ± 1,64 ^{bcA}	43,13 ± 3,26 ^{c}c

Fonte: Dados da pesquisa. Médias ± desvio padrão de três determinações. Letras minúsculas comparam variedades dentro de cada coluna; letras maiúsculas comparam métodos dentro de cada linha. Médias que compartilham ao menos uma letra na comparação correspondente não diferem pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Rockenbach et al. (2011a; 2011b) observaram diferenças na resposta antioxidante entre variedades e frações do bagaço. Drosou et al. (2015) também descreveram variação conforme o processo extrativo. A discrepância entre a posição das variedades nos ensaios de fenólicos, flavonoides e DPPH corresponde a medidas distintas; o percentual de inibição observado ainda depende da concentração do extrato aplicado no ensaio.

A análise conjunta não identificou uma variedade superior em todas as determinações. Por Soxhlet, Arinto e Pinot Noir integraram o grupo de maior teor de fenólicos totais, enquanto Syrah apresentou o maior teor de flavonoides totais. Pinot Noir por Soxhlet apresentou a maior inibição numérica por DPPH, mas o método de maior resposta diferiu para

Syrah e Merlot. Xu et al. (2016) também observaram que os maiores teores fenólicos e a maior resposta por DPPH podem ocorrer em diferentes variedades de bagaço de uva.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As farinhas de Arinto, Pinot Noir, Syrah e Merlot apresentaram composições centesimais distintas. Syrah reuniu as maiores médias de proteínas, lipídeos e fibra bruta, enquanto Merlot apresentou a maior média de carboidratos. Para as quatro variedades, Soxhlet proporcionou os maiores teores de compostos fenólicos e flavonoides totais por grama de farinha. Arinto e Pinot Noir integraram o grupo de maior teor fenólico nesse método; Syrah apresentou o maior teor de flavonoides. A maior inibição numérica por DPPH ocorreu em Pinot Noir extraída por Soxhlet, mas não diferiu da resposta obtida por ultrassom. Para Syrah, a maior inibição foi obtida com micro-ondas; para Merlot, ultrassom e micro-ondas formaram o grupo de maior resposta. A combinação de variedade e método associada aos maiores resultados depende, portanto, da propriedade medida.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG, CAPES 001 e CNPq (Processos 313447/2021-7 e 303662/2025-5).

REFERÊNCIAS

BERES, Carolina et al. Antioxidant dietary fibre recovery from Brazilian Pinot noir grape pomace. Food Chemistry, v. 201, p. 145–152, 2016. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.01.039.

BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT – Food Science and Technology, v. 28, n. 1, p. 25–30, 1995. DOI: 10.1016/S0023-6438(95)80008-5.

CARPENTIERI, Serena; FERRARI, Giovanna; PATARO, Gianpiero. Pulsed electric fields-assisted extraction of valuable compounds from red grape pomace: process optimization using response surface methodology. Frontiers in Nutrition, v. 10, art. 1158019, 2023. DOI: 10.3389/fnut.2023.1158019.

DROSOU, Christina; KYRIAKOPOULOU, Konstantina; BIMPILAS, Andreas; TSIMOGIANNIS, Dimitrios; KROKIDA, Magdalini. A comparative study on different extraction techniques to recover red grape pomace polyphenols from vinification byproducts. Industrial Crops and Products, v. 75, p. 141–149, 2015. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.05.063.

GERARDI, Carmela et al. Strategies for reuse of skins separated from grape pomace as ingredient of functional beverages. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, v. 8, artigo 645, 2020. DOI: 10.3389/fbioe.2020.00645.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Métodos físico-químicos para análise de alimentos. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. Disponível em: https://www.ial.sp.gov.br/ial/publicacoes/livros/metodos-fisico-quimicos-para-analise-de-alimentos. Acesso em: 24 set. 2026.

JIA, Zhishen; TANG, Mengcheng; WU, Jianming. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. Food Chemistry, v. 64, n. 4, p. 555–559, 1999. DOI: 10.1016/S0308-8146(98)00102-2.

MACHADO, Adriana Rodrigues et al. Chemical characterization of the cultivar 'Vinhão' (Vitis vinifera L.) grape pomace towards its circular valorisation and its health benefits. Measurement: Food, v. 15, artigo 100175, 2024. DOI: 10.1016/j.meafoo.2024.100175.

MONTEIRO, Gean Charles et al. Bioactive compounds and antioxidant capacity of grape pomace flours. LWT, v. 135, art. 110053, 2021. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.110053.

OIV – ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DA VINHA E DO VINHO. OIV statistical brief: wine, table grapes & dried grapes in 2024. Paris: OIV, set. 2025. Disponível em: https://www.oiv.int/sites/default/files/documents/OIV_Statistical_Brief-Wine_Table_Grapes_and_Dried_Grapes_in_2024.pdf. Acesso em: 23 set. 2026.

PEIXOTO, Carla M. et al. Grape pomace as a source of phenolic compounds and diverse bioactive properties. Food Chemistry, v. 253, p. 132–138, 2018. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.01.163.

ROCKENBACH, Ismael Ivan et al. Phenolic compounds content and antioxidant activity in pomace from selected red grapes (Vitis vinifera L. and Vitis labrusca L.) widely produced in Brazil. Food Chemistry, v. 127, n. 1, p. 174–179, 2011a. DOI 10.1016/j.foodchem.2010.12.137

ROCKENBACH, Ismael Ivan et al. Phenolic compounds and antioxidant activity of seed and skin extracts of red grape (Vitis vinifera and Vitis labrusca) pomace from Brazilian winemaking. Food Research International, v. 44, n. 4, p. 897–901, 2011b. DOI 10.1016/j.foodres.2011.01.049.

SINGLETON, Vernon L.; ORTHOFER, Rudolf; LAMUELA-RAVENTÓS, Rosa M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. Methods in Enzymology, v. 299, p. 152–178, 1999. DOI: 10.1016/S0076-6879(99)99017-1.

SOUSA, Eldina Castro et al. Chemical composition and bioactive compounds of grape pomace (Vitis vinifera L.), Benitaka variety, grown in the semiarid region of Northeast Brazil. Food Science and Technology, v. 34, n. 1, p. 135–142, 2014. DOI: 10.1590/S0101-20612014000100020.

XU, Yixiang; BURTON, Sheanell; KIM, Chyer; SISMOUR, Edward. Phenolic compounds, antioxidant, and antibacterial properties of pomace extracts from four Virginia-grown grape varieties. Food Science & Nutrition, v. 4, n. 1, p. 125–133, 2016. DOI: 10.1002/fsn3.264

CAPÍTULO XVII

NANOCAREADORES FARMACÊUTICOS: DEVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA E A ASSOCIAÇÃO TEMÁTICA COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, SÍNTESE VERDE, NANOTOXICIDADE, MEDICINA PERSONALIZADA E ESCALONAMENTO

PHARMACEUTICAL NANOCARRIERS: RETURNING SCIENTIFIC PRODUCTION AND THE THEMATIC ASSOCIATION WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE, GREEN SYNTHESIS, NANOTOXICITY, PERSONALIZED MEDICINE, AND SCALING UP

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-17

Isabel Cristina Vicente dos Santos [1]
Karl Marx Vicente dos Santos [2]

[1] Mestra em Engenharia Química . Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN
[2] Graduando em Licenciatura em Química. Universidade Estadual Da Paraíba – UEPB

RESUMO

Esse estudo teve como objetivo analisar a evolução das publicações e as associações temáticas entre inteligência artificial, síntese verde, nanotoxicidade, medicina personalizada e escalonamento no contexto dos nanocarreadores farmacêuticos. Realizou-se uma análise bibliométrica de documentos recuperados nas bases Scopus e na web of Science considerando o período de 2005 a 2025. Após a triagem a e aplicação dos critérios de seleção, o corpus final foi composto por 1005 documentos com pelo menos um marcador temático detectado em títulos, resumos ou palavras-chave dos autores. Foram analisadas a produção anual, a coocorrência de palavras-chave e as frequências e combinações de marcadores utilizando Python e Vosviewer. Os resultados mostraram concentração de 73,4% dos documentos entre 2021 e 2025. A rede apresentou 29 palavras-chaves, 266 ligações e quatro grupos. Medicina personalidade e escalonamento foram os marcadores mais frequentes presente em 32,3% e 31,0% dos documentos, respetivamente. Predominaram registros com um único eixo detectado (83,4%), enquanto 13,6% apresentaram dois ou mais eixo. Conclui-se que a combinação entre medicina personalizada e escalonamento foi a mais frequente no corpus, seguida pela associação de inteligência artificial com esses dois eixos. Em constante, os marcadores de síntese verde e nanotoxicidade apareceram menos frequentemente em conjuntos com os demais temas. O recorde analisado apresentou, portanto, maior associação temática entre personalização terapêutica, abordagens computacionais e produção com menos presença conjunto de marcadores de sustentabilidade e toxidade.

Palavras-chave: Nanotransporte de farmacos. Bibliometria. Vosviewer.

ABSTRACT

This study aimed to analyze publication trends and thematic associations among artificial intelligence, green synthesis, nanotoxicity, personalized medicine, and scale-up in the context of pharmaceutical nanocarriers. A bibliometric analysis was conducted using documents retrieved from Scopus and Web of Science covering the period from 2005 to 2025. After screening and applying the selection criteria, the final corpus comprised 1,005 documents with at least one thematic marker detected in their titles, abstracts, or author keywords. Annual publication output, keyword co-occurrence, and the frequencies and combinations of thematic markers were analyzed

using Python and VOSviewer. The results showed that 73.4% of the documents were published between 2021 and 2025. The network comprised 29 keywords, 266 links, and four clusters. Personalized medicine and scale-up were the most frequent markers, appearing in 32.3% and 31.0% of the documents, respectively. Records with a single detected thematic dimension predominated (83.4%), whereas 13.6% included two or more dimensions. The combination of personalized medicine and scale-up was the most frequent in the corpus, followed by the association of artificial intelligence with these two dimensions. In contrast, green synthesis and nanotoxicity markers co-occurred less frequently with the other themes. Thus, the analyzed corpus showed stronger thematic associations among therapeutic personalization, computational approaches, and production, with less frequent co-occurrence of sustainability and toxicity markers.

Keywords: Education. Health. Environment.

1. INTRODUÇÃO

A eficácia de um tratamento farmacológico não dependa apenas da atividade farmacológica do fármaco, mas também de sua capacidade em alcançar o sítio de ação em concentração terapêuticas e mantê-la pelo tempo necessário para produzir o efeito desejado (Rizk et al.,2017). Entretanto, muitos fármacos apresentam limitações físico-químicas e biológicas que podem comprometer sua eficácia terapêutica, como baixa solubilidade em meio aquoso, instabilidade, rápida degradação, reduzida biodisponibilidade, distribuição inespecífica no organismo e potencial ocorrência de efeito adverso (Pouton,2006; Kalepu; Nekkanti, 2015; Adepu; Ramakrishna, 2021).

Diante dessa limitação dos fármacos, os nanocarreadores têm sido amplamente investigados como sistemas capazes de otimizar a entrega da fármacos, melhorar sua disponibilidade, proteger moléculas sensíveis contra degradação e reduzir efeitos indesejados associados à administração convencional (Mazdaei; Asare-Addp, 2022). Nesse sentido, esses sistemas representam uma estratégia promissória no campo nanomedicina, pois permitem maior controle sobre a liberação, o direcionamento e a interação dos agentes terapêuticos com tecidos e células-alvo (Patra et al., 2018).

Além do transporte de fármacos convencionais, o nanocarregadores podem atuar como plataforma versáteis para a veiculação de biomoléculas, ácido nucleico, proteínas, peptídeos, e agente de imagem (Pudlarz; Szemrai, 2028; Sim; Wong,2021: mendes et al.,2022). Essa versatilidade amplia suas possibilidades de aplicação em diferentes áreas biomédicas, incluindo o tratamento de câncer, doenças inflamatórias, infecções, distúrbios neurológicos e medicina regenerativa(Patra et al., 2018; Huang et al.,2024; Rajendran et al., 2023; Gressler et al., 2025).

Em virtude dessas características, diversas classes de nanocarreadores vêm sendo desenvolvida e avaliadas em estudos de liberação de fármacos e nanomedicina. Entre as principais, destacam-se os sistemas poliméricos, lipídicos, dendrímeros, inorgânicos, a base de carbono e biológico ou biomiméticos (Din et al., 2017; Li et al., 2021; Mahor et al., 2021; Alshawwa et al., 2022).

Essas categorias abrangem plataformas como nanopartículas poliméricas, lipossomas, nanopartículas lipídica sólidas, carreadores lipídicos nanoestruturaddos, micelas, nanopartículas de sílica mesoporosa, nanopartículas de ouro, óxido de ferro, quantum dots, nanotubos de carbono,grafeno, fulenoss, exossimos, vesículas extracelulares, particulas virais e particulas baseadas em albumina (Chen et al., 2026; Sultana et al., 2022; Lu et al., 2021; Debnath; Srivastava, 2021; Li et al., 2021; Steinmetz, 2010; Qu et al., 2024). Contudo, a diversidade de materiais empregada na fabricação de nanocarreadores levanta preocupações toxicológica e ambientais, principalmente quando a biocompatibilidade, biodegradabilidade e ao impacto dos processos produtivos. Assim, torna-se necessário conciliar inovação tecnológica, segurança e sustentabilidade de no desenvolvimento desses sistemas.

Essa necessidade amplia discussões para além das características individuais dos nanocarreadores, exigindo considerar as relações entre seus planejamentos, produção, avaliação de segurança e aplicações terapêuticas. Nesse contexto, destaca-se cinco eixos temáticos: Inteligência artificial, síntese verde, nanotoxicidade, medicina personalizada e escalamento de processos. A investigação de como esses temas se articulam na literatura pode contribuir para compreender as aproximações entre diferentes abordagens e reconhecer aspectos de demandam maior investigação.

Embora a produção científica sobre nanocarreadores farmacêuticos tenha se expandido de forma expressiva nas últimas décadas, esse conhecimento ainda se apresenta em grande medida, fragmentado em eixos temáticos pouco articulados. A literatura contempla, separadamente aplicações de inteligência artificial á nanomedicina, estratégia de síntese verde de nanopartículas, estudos de nanotoxicidade, abordagem de medicina personalizada e desafios relacionados ao escalonamento industrial. Contudo permanece limitada a compreensão bibliométrica intrigada de como esses temas se conectam. Essa lacuna dificulta a identificação de tendência, estratégias e prioridades científicas capazes de orientar o desenvolvimento planejado, seguro, sustentável e aplicável à prática farmacêutica de nanocarreadores .

Portanto, esse estudo teve como objetivo desenvolver uma análise bibliométrica da produção científica sobre nanocarreadores farmacêuticos, investigando as conexões entre inteligência artificial, síntese verde, nanotoxicidade, medicina personalizada e escalamento industrial com o propósito de identificar tendências, lacunas e prioridades para o desenvolvimento planejado, seguro, sustentável e aplicável à prática farmacêutica.

2. METODOLOGIA

2.1. PROCEDIMENTO DE BUSCA NAS BASES DE DADOS

As buscas bibliográficas foram realizadas nas bases da Scopus e Web of Science. O uso combinado dessas duas bases de dados permitiu ampliar a busca de documentos sobre nanocarreadores e reduzir limitações associada à consulta de uma única fonte de informação cientifica sobre a temática. Para avaliar o grau de integração entre os diferentes temas investigados, o conjunto geral de documentos foi dividido em subconjunto temáticos. Cada subconjunto corresponde a uma combinação de palavras-chave em inglês relacionados a nanocarreadores como “nanocarrier”, “nanoformulation”, Pharmaceutical nanocarrier” e “nanoparticle drug delivery”, com expressões específicas de cada eixo. O operador booleano OR foi utilizado para reunir termos alternativos, enquanto AND associou os termos de nanocarreadores aos temas investigados.

No bloco de inteligências artificial, foram empregados termos como “artificial intelligence”,” machine learning”, deep learning” e “neural network” . A estratégia da Scopus também contemplou expressões relacionadas a modelo preventivos e computacionais, enquanto a da Web of Science incluiu termos como “ Random forest”, “support vector machine” e “Bayesian optimization”. Foram recuperados 303 documentos da Scopus e 521 da Web of Science.

Para síntese verde, foram utilizadas expressões relacionadas a “green synthesis”, “green chemistry” e solventes verdes, resultando em 315 documentos na Scopus e 429 na WEB OF Science . A busca sobre nanooxicidade combinou os termos de nanocarreadores com “nanotoxicity e nanoparticle toxicity” , recuperando 95 e 97 documentos, respetivamente.

No eixo de medicina personalizada, foram empregados os termos “personalized medicine” e “precision medicine” , com retorno de 766 documentos na Scopus e 512 na Web of Science. Para escalamento a busca contemplaram “scale-up” e “large-scale production” associados aos termos de nanocarreadores, resultando em 365 documentos nas Scopus e 295

da Web of Science. Adicionamente, foi realizada uma busca reuniu simultaneamente os cincos eixos por meio de um operador AND. Essa estratégia não recuperou documentos em nenhum das bases.

Na sequência, foi aplicado filtro de seleção relativos ao à recorte temporal (2005 a 2025), a tipologia documental, restringindo-se à busca a artigos científico e revisões bibliográficas, linguagem inglesa, área temática correspondente a farmacologia, toxicologia e produtos farmacêutico, bioquímica, genética e biologia molecular, ciência dos materiais, medicamentos, engenharia química, química e ciência da computação, com fonte do tipo periódico científico. A partir desse critério obteve-se inicialmente o corpus composto por 3668 registros, sendo 1814 proveniente da Scopus e 1854 da Web of Science, destinados à análise. Os registros selecionados foram exportados em formato CSV, RIS e BibTEX para tratamento e organização dos dados, finalizando essa coleta de dados em 30 de abril de 2026.

2.2. TRIAGEM DOS ARTIGOS, REMOÇÃO DE DUPLICAÇÃO RAYYAN

A plataforma Rayyan foi utilizada para a organização das referências exportadas da Scopus (Elsevier) e da Web of Science (Core Collection), Possibilitando a eliminação de registros duplicados e a triagem manual dos artigos por título e resumo. Os dados de ambas as bases foram importados no formato RIS para a plataforma, onde foi realizada inicialmente uma triagem para identificação de duplicatas. Do total de 3668 artigos resultante da integração das duas bases, 1479 eram duplicatas, as quais foram excluídos resultando em 2189 artigos para a etapa seguinte.

Em seguida, procedeu-se a leitura dos títulos e resumos dos 2189 artigos remanescentes com base nos critérios de inclusão como artigos e revisões publicados entre 2005 a 2025, publicações em inglês, estudo sobre nanopartículas ou nanocarreadores com aplicações em terapia, diagnostico terapêutico ou formulação farmacêutica. Foram definidos com critério de exclusão a ausência de relação com nanocarreadores, nanoformulações ou nanomedicina. Além disso, aplicações sem finalidade farmacêutica ou biométrica, como também metadados insuficientes e duplicidade de registros.

Além disso, para delimitar o corpus da análise temática, aplicou-se um critério que pelo menos um documento sobre nanocarreadores deveria ter a presença de um marcador relacionado à inteligência artificial, síntese verde, nanotoxicidade, medicina personalizada e

escalamento industrial. No final obteve-se uma amostra de 1005 registros, os quais foram incluídos na análise de bibliométrica e no mapeamento científico.

2.3. BIBLIOMETRIX

Os registros da Scopus e da web of Science exportados nos formatos CVS e BibTEX foram importados para o Biblioshiny, interface gráfica do pacote Bibliometrix do programa R, na qual foram combinados e organizados em uma única base para a realização das análises bibliométricas. Posteriormente, esses dados foram confrontados com a lista final de estudos selecionada no Rayyan, de modo a assegurar que apenas os 1005 documentos elegíveis integrassem a etapa analítica final.

2.4. EVOLUÇÃO ANUAL DAS SOLICITAÇÕES

A evolução anual foi analisada pela contagem dos documentos segundo o ano de publicação. Considerou-se o período de 2005 a 2025, utilizando a base selecionada de 1005 documentos. O gráfico de barra foi criado no Python na biblioteca Matplotlib. A variação percentual em 2024 e 2025 foi calculada pela diferença entre as contagens desses anos, dividida pelas contagens 2024 multiplicada por 100

2.5. ANÁLISE DE COOCORRÊNCIA DE PALAVRAS-CHAVE

A análise de coocoerência foi realizada no VOSviewer (versão 1.3. 21), a partir da base de 1005 documentos, utilizando exclusivamente o campo de palavras-chave dos autores (Author Keywords) . Para padronizar os termos, utilizou-se um arquivo de thesaurus com equivalência entre variantes de escrita e exclusão de descritores genéricos. Os termos artificiais intelligence” e “ machine learning” foram mantidos separadamente.

NO VOSviewer, selecionaram-se as opções Co-occurrence, Author Keywords e Full counting. Estabeleceu-se o mínimo de 20 ocorrência por palavras-chave, mantendo-se todos os 29 termos que atenderam aos critérios. A concorrência corresponde à presença de duas palavras-chave no mesmo documento.

2.6. FREQUÊNCIAS E COMBINAÇÕES DE MARCADORES TEMÁTICOS

Foram analisados cincos eixos: inteligência artificial, síntese verde, nanotoxicidade, medicina personalizada e escalamento industrial . A identificação dos marcadores foi realizada automaticamente em Python, mediante busca de expressões prevista em um dicionário temático nos títulos, resumos e palavras-chave dos autores. Para cada documento, atribuir-se o valor 1 quando foi detectado um marcador do eixo e 0 quando nenhum marcador desse

eixo foi identificado. Cada documento foi contado apenas uma vez por eixo mesmo quando apresentada várias expressões relacionadas. Um mesmo documento pode receber marcadores de diferentes eixos.

O corpus analítico foi composto pelos 1005 documentos que apresentaram pelo menos um marcador pelas regras iniciais. As frequências absolutas e percentuais foram calculadas para cada eixo, utilizando 1005 com denominador. Também foram contabilizados os documentos com marcadores de dois eixos simultaneamente e a quantidade de eixos detectados por documento. As contagens foram reproduzidas em Python no Google Colab, com NumPy, e os gráficos foram elaborados com Matplotlib.

3. RESULTADOS E DISCURSÕES

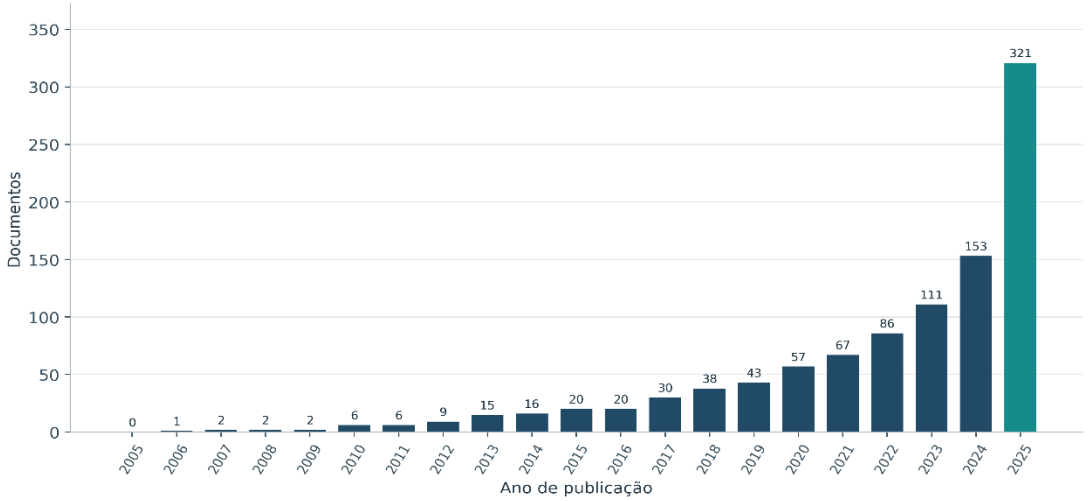
O interesse pelos nanocarreadores farmacêuticos está associado à necessidade de melhorar o desempenho dos sistemas convencionais de administração de fármacos, frequentemente limitados por baixa solubilidade, instabilidade, reduzida biodisponibilidade, absorção insuficiente, dificuldade de entrega alvo-específica e possíveis efeitos adversos (Kantesaria e Panda, 2026).

Entre os marcos iniciais dos nanocarreadores, destacam-se o trabalho de Bangham, Standish e Watkins (1965), que descreveu estruturas lamelares formadas por fosfolipídios, contribuindo para as bases do desenvolvimento dos lipossomas. Esses sistemas passaram a ganhar importância farmacêutica quando Gregoriadis e Ryman (1971) propuseram o uso de lipossomas como carreadores de enzimas ou fármacos, reforçando o potencial desses sistemas para a entrega de moléculas terapêuticas.

Em seguida, o campo avançou com o desenvolvimento de diferentes tipos de nanocarreadores, incluindo nanopartículas poliméricas. Em 1979, Couvreur et al., (1979) investigaram nanopartículas de polialquilcianoacrilato associadas a fármacos antineoplásicos, ampliando as possibilidades de uso desses sistemas na entrega de medicamentos. A aprovação do Doxil®, em 1995, reconhecido como o primeiro nanomedicamento aprovado pela FDA, representou um avanço importante na aplicação clínica dos nanocarreadores farmacêuticos (Barenholz, 2012). Esses avanços contribuíram para ampliar o interesse pelos nanocarreadores como sistemas capazes de melhorar a estabilidade, a biodisponibilidade e a entrega de moléculas terapêuticas, favorecendo sua chegada ao local de ação (Crintea et al., 2022).

Diante disso, a área passou por um processo de diversificação, incorporando novas frentes de investigação, como inteligência artificial, síntese verde, nanotoxicidade, medicina personalizada e desafios de escalonamento industrial, o que se reflete no aumento do volume de publicações científica sobre nanocarreadores farmacêuticos no período de 2005 a 2026, conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1 – Evolução anual das publicações sobre nanocarreadores nos cinco eixos temáticos.



Fonte: Própria autoria, 2026

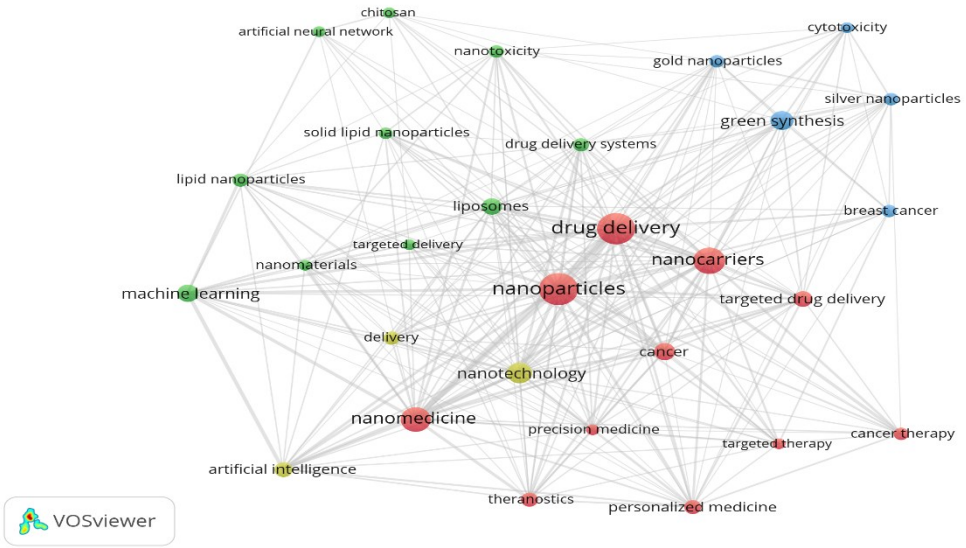
Na Figura 2, observa-se que, entre 2005 e 2020, a produção científica apresentou crescimento discreto, mantendo-se em volumes baixos de publicação, com menos de sessenta artigos publicados por ano. Esse comportamento indica uma menor presença da temática na literatura recuperada durante os primeiros anos do recorte.

Por outro lado, a distribuição temporal apresentou concentração de documentos nos anos de 2021 a 2025. Dos 1.005 documentos analisados, 738 foram publicados entre 2021 e 2025, correspondendo a 73,4% do corpus. O maior número foi registrado em 2025, com 321 documentos, seguido de 2024 com 153 arquivos. Entre esses dois anos, houve aumento de 109,8% (Figura 1). Esse crescimento evidencia a consolidação e o avanço dessas temáticas no campo da nanotecnologia aplicada às ciências farmacêuticas, bem como o crescente interesse da comunidade científica por sistemas nanoestruturados voltados à inovação terapêutica, segurança, sustentabilidade e viabilidade tecnológica.

3.1. REDE DE PALAVRAS-CHAVE NO VOSVIEWER

A rede de palavras chaves ilustrado na Figura 3, sugere que a liberação de fármacos constitui um tema de ligação entre diferentes abordagens presentes no corpus. A elevada frequência de termos como “nanoparticles”, “drug delivery”, “nanocarriers” e “nanomedicine”, reunidos no grupo vermelho, evidencia a presença de uma base conceitual compartilhada entre os documentos. A inclusão de termos relacionados ao câncer, à medicina personalizada e à teranóstica nesse grupo indica uma associação lexical entre plataformas de entrega e aplicações terapêuticas e diagnósticas.

No grupo azul, a associação entre síntese verde, nanopartículas metálicas, citotoxicidade e câncer de mama sugere uma aproximação entre estratégias de síntese e investigação de efeitos biológicos. Nesse contexto, a síntese verde ganhou importância por buscar materiais biodegradáveis, solventes menos agressivos, processos com menor consumo energético, menor geração de resíduos e maior compatibilidade ambiental (Huguet-Casquero; Gainza; Pedraz, 2021; Ying et al., 2022). Além de minimizar os impactos ambientais, essa abordagem pode reduzir os riscos toxicológicos associados aos nanocarreadores, uma vez que prioriza insumos biocompatíveis e condições de processamento mais brandas, ampliando seu potencial de aplicação em áreas como a entrega de fármacos e a nanomedicina.



Fonte: Própria autoria, 2026

Entretanto, a utilização de rotas de síntese verde não elimina a necessidade de avaliações toxicológicas desse matérias, uma vez que a toxicidade das nanopartículas e dos nanocarreadores está associada a diferentes parâmetros físico-químicos e biológicos como tamanho, morfologia, carga superficial, composição química, concentração, via de exposição, estabilidade coloidal e grau de agregação (Ajdary et al., 2018; Thu et al., 2023). Segundo Ajdary et al. (2018), essas propriedades podem influenciar a captação celular, a biodistribuição, a resposta imunológica e a geração de espécies reativas de oxigênio, podendo desencadear processos inflamatórios e danos ao DNA.

O grupo verde reúne materiais e sistemas de liberação, como lipossomas e nanopartículas lipídicas, associados a termos relacionados ao aprendizado de máquina e à nanotoxicidade. Essa composição sugere conexões entre o desenvolvimento de formulações, as abordagens computacionais e a avaliação de toxicidade.

A distribuição de “artificial intelligence” e “machine learning” em grupos distintos mostra que expressões conceitualmente relacionadas podem apresentar padrões diferentes de coocorrência. Nesse contexto, Gholap et al. (2024) destacam a utilização da inteligência artificial em diferentes etapas do desenvolvimento farmacêutico, incluindo a formulação e o desenvolvimento de sistemas inteligentes de liberação de fármacos, em associação com nanotecnologias. Essas ferramentas podem auxiliar na análise de dados, na otimização de formulações e na previsão do desempenho de sistemas nanoestruturados.

3.2. FREQUÊNCIAS E COMBINAÇÕES DE MARCADORES TEMÁTICOS

A Tabela 1, mostra que os marcadores de medicina personalizada e escalonamento foram os mais recorrentes, identificados em 325 (32,3%) e 312 documentos (31,0%), respectivamente. Síntese verde e inteligência artificial apresentaram frequências próximas, com 226 (22,5%) e 225 registros (22,4%), enquanto os marcadores de nanotoxicidade foram detectados em 85 documentos (8,5%).

Tabela 1 – Frequência dos marcadores temáticos nos documentos do corpus analisado (2005–2025).

Marcadores	Documentos	Percentual do corpus
Inteligência artificial	225	22,4 %
Síntese Verde	226	22,5%
Nanotoxicidade	85	8,5%
Medicina personalizada	325	32,3%
Escalonamento	312	31,0%

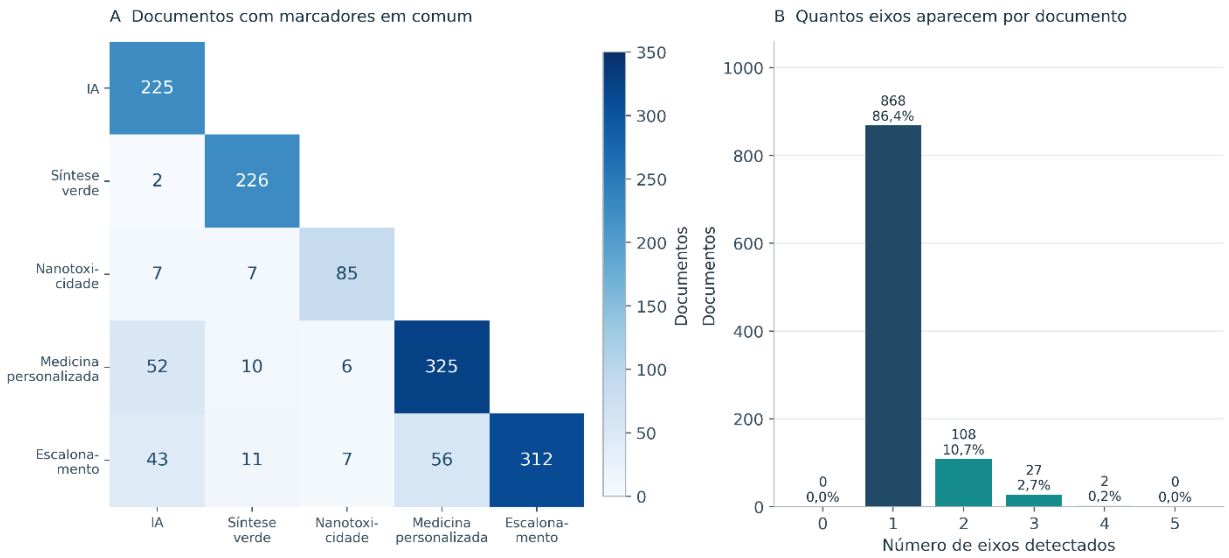
Fonte: Própria autoria, 2026

A presença de marcadores de medicina personalizada e escalonamento sugere que o corpus contempla tanto abordagens voltadas à individualização terapêutica quanto questões relacionadas à produção dos nanocarreadores. Essa interpretação pode ser discutida de acordo com Younis et al. (2022), que destacam desafios associados à transposição dos resultados experimentais para aplicações clínicas, incluindo escalonamento, regulamentação e métodos de produção.

Os marcadores de síntese verde e nanotoxicidade, por sua vez, permitem discutir a presença de aspectos de sustentabilidade e segurança no conjunto analisado. Radulescu et al. (2023) abordam métodos de síntese verde de nanopartículas e suas aplicações biomédicas, enquanto Ahmad, Imran e Sharma (2022) destacam a avaliação da toxicidade como aspecto fundamental para o desenvolvimento de nanocarreadores.

As categorias temáticas não são exclusivas, uma vez que um documento pode apresentar marcadores de diferentes eixos. Assim, a soma das frequências corresponde a 1.173 atribuições em 1.005 documentos distintos. A Figura 3 complementa a tabela ao apresentar as combinações entre os marcadores e a quantidade de eixos detectados por documento.

Figura 3 – Coocorrência de marcadores temáticos (A) e número de eixos por documento (B).



Fonte: Própria autoria, 2026

Na Figura 3A, a combinação mais frequente ocorreu entre medicina personalizada e escalonamento, presente em 56 documentos (5,6%). Em seguida, destacaram-se inteligência artificial e medicina personalizada, com 52 documentos (5,2%), e inteligência artificial e escalonamento, com 43 (4,3%). Essas combinações sugerem aproximações temáticas entre abordagens computacionais, individualização terapêutica e produção.

A figura 3B mostra o predomínio de documentos com marcadores de apenas um eixo, totalizando 868 registros (86,4%). Foram identificados 108 documentos com dois eixos (10,7%), 27 com três (2,7%) e dois com quatro (0,2%). Nenhum registro apresentou marcadores dos cinco eixos simultaneamente. Ao todo, 137 documentos (13,6%) apresentaram dois ou mais eixos. Esses resultados mostram que a detecção simultânea de diferentes eixos foi menos frequente que a identificação de um único eixo no recorte analisado.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise bibliométrica dos 1.005 documentos permitiu descrever a evolução das publicações e examinar as associações entre marcadores de inteligência artificial, síntese verde, nanotoxicidade, medicina personalizada e escalonamento no contexto dos nanocarreadores farmacêuticos. Observou-se concentração das publicações nos anos de 2021 a 2025, enquanto a rede de palavras-chave revelou quatro grupos com diferentes combinações de materiais, aplicações terapêuticas e abordagens tecnológicas.

Os marcadores de medicina personalizada e escalonamento apresentaram as maiores frequências no corpus. Entretanto, predominou a identificação de apenas um eixo por documento. As combinações mais frequentes envolveram medicina personalizada, escalonamento e inteligência artificial, indicando aproximações temáticas entre individualização terapêutica, produção e abordagens computacionais.

REFERÊNCIAS

ADEPU, Shivakalyani; RAMAKRISHNA, Seeram. Controlled drug delivery systems: current status and future directions. Molecules, v. 26, n. 19, p. 5905, 2021.

AHMAD, Anas; IMRAN, Mohammad; SHARMA, Nisha. Precision nanotoxicology in drug development: current trends and challenges in safety and toxicity implications of customized multifunctional nanocarriers for drug-delivery applications. Pharmaceutics, v. 14, n. 11, p. 2463, 2022.

AJDARY, Marziyeh et al. Health concerns of various nanoparticles: a review of their in vitro and in vivo toxicity. Nanomaterials, v. 8, n. 9, p. 634, 2018.

ALSHAWWA, Samar Zuhair et al. Nanocarrier drug delivery systems: characterization, limitations, future perspectives and implementation of artificial intelligence. Pharmaceutics, v. 14, n. 4, p. 883, 2022.

BANGHAM, Alec D.; STANDISH, Malcolm M.; WATKINS, Jeff C. Diffusion of univalent ions across the lamellae of swollen phospholipids. Journal of Molecular Biology, v. 13, n. 1, p. 238-252, 1965.

BARENHOLZ, Yechezkel Chezy. Doxil®—The first FDA-approved nano-drug: lessons learned. Journal of Controlled Release, v. 160, n. 2, p. 117-134, 2012.

CHEN, Shizhu et al. Inorganic nanomaterials as carriers for drug delivery. Journal of Biomedical Nanotechnology, v. 12, n. 1, p. 1-27, 2016.

COUVREUR, P. et al. Adsorption of antineoplastic drugs to polyalkylcyanoacrylate nanoparticles and their release in calf serum. Journal of Pharmaceutical Sciences, v. 68, n. 12, p. 1521-1524, 1979.

CRINTEA, Andreea et al. Nanocarriers for drug delivery: an overview with emphasis on vitamin D and K transportation. Nanomaterials, v. 12, n. 8, p. 1376, 2022.

DEBNATH, Sujit Kumar; SRIVASTAVA, Rohit. Drug delivery with carbon-based nanomaterials as versatile nanocarriers: progress and prospects. Frontiers in Nanotechnology, v. 3, p. 644564, 2021.

DIN, Fakhar Ud et al. Effective use of nanocarriers as drug delivery systems for the treatment of selected tumors. International Journal of Nanomedicine, v. 12, p. 7291-7309, 2017.

GREGORIADIS, Gregory; RYMAN, B. E. Liposomes as carriers of enzymes or drugs: a new approach to the treatment of storage diseases. Biochemical Journal, v. 124, n. 5, p. 58P, 1971.

GRESSLER, Sabine et al. A systematic review of nanocarriers used in medicine and beyond definition and categorization framework. Journal of Nanobiotechnology, v. 23, n. 1, p. 90, 2025.

HUANG, Yujing et al. Nanotechnology's frontier in combatting infectious and inflammatory diseases: prevention and treatment. Signal Transduction and Targeted Therapy, v. 9, n. 1, p. 34, 2024.

HUGUET-CASQUERO, Amaia; GAINZA, Eusebio; PEDRAZ, Jose Luis. Towards green nanoscience: from extraction to nanoformulation. Biotechnology Advances, v. 46, p. 107657, 2021.

KALEPU, Sandeep; NEKKANTI, Vijaykumar. Insoluble drug delivery strategies: review of recent advances and business prospects. Acta Pharmaceutica Sinica B, v. 5, n. 5, p. 442-453, 2015.

KANTESARIA, Riddhi; PANDA, Himanshu Sekhar. A review on AI-based data-driven models for optimization of nanocarriers as drug delivery systems. ACS Biomaterials Science & Engineering, v. 12, n. 3, p. 1397-1418, 2026.

LI, Aixue et al. Cell-derived biomimetic nanocarriers for targeted cancer therapy: cell membranes and extracellular vesicles. Drug Delivery, v. 28, n. 1, p. 1237-1255, 2021.

LU, Hongyun et al. A review on polymer and lipid-based nanocarriers and its application to nano-pharmaceutical and food-based systems. Frontiers in Nutrition, v. 8, p. 783831, 2021.

MAHOR, Alok et al. Carbon-based nanomaterials for delivery of biologicals and therapeutics: a cutting-edge technology. C, v. 7, n. 1, p. 19, 2021.

MAZDAEI, Mahsa; ASARE-ADDO, Kofi. A mini-review of nanocarriers in drug delivery systems. British Journal of Pharmacy, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2022.

MENDES, Bárbara B. et al. Nanodelivery of nucleic acids. Nature Reviews Methods Primers, v. 2, n. 1, p. 24, 2022.

PATRA, Jayanta Kumar et al. Nano based drug delivery systems: recent developments and future prospects. Journal of Nanobiotechnology, v. 16, n. 1, p. 71, 2018.

POUTON, Colin W. Formulation of poorly water-soluble drugs for oral administration: physicochemical and physiological issues and the lipid formulation classification system. European Journal of Pharmaceutical Sciences, v. 29, n. 3-4, p. 278-287, 2006.

PUDLARZ, Agnieszka; SZEMRAJ, Janusz. Nanoparticles as carriers of proteins, peptides and other therapeutic molecules. Open Life Sciences, v. 13, n. 1, p. 285-298, 2018.

QU, Na et al. Albumin nanoparticle-based drug delivery systems. International Journal of Nanomedicine, v. 19, p. 6945-6980, 2024.

RAJENDRAN, Arun Kumar et al. Nanotechnology in tissue engineering and regenerative medicine. Korean Journal of Chemical Engineering, v. 40, n. 2, p. 286-301, 2023.

RIZK, M. L. et al. Importance of drug pharmacokinetics at the site of action. Clinical and Translational Science, v. 10, n. 3, p. 133-142, 2017.

SIM, Serjay; WONG, Nyet Kui. Nanotechnology and its use in imaging and drug delivery. Biomedical Reports, v. 14, n. 5, p. 42, 2021.

STEINMETZ, Nicole F. Viral nanoparticles as platforms for next-generation therapeutics and imaging devices. Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine, v. 6, n. 5, p. 634-641, 2010.

SULTANA, Afreen et al. Nano-based drug delivery systems: conventional drug delivery routes, recent developments and future prospects. Medicine in Drug Discovery, v. 15, p. 100134, 2022.

YING, Shuaixuan et al. Green synthesis of nanoparticles: current developments and limitations. Environmental Technology & Innovation, v. 26, p. 102336, 2022.

YOUNIS, Mahmoud A. et al. Clinical translation of nanomedicines: challenges, opportunities, and keys. Advanced Drug Delivery Reviews, v. 181, p. 114083, 2022.

CAPÍTULO XVIII

EDUCAÇÃO CIENTÍFICA NÃO FORMAL E ANIMAÇÃO SOCIOEDUCATIVA: APRENDIZAGEM EXPERIENCIAL ATRAVÉS DE ESTÁGIOS CURRICULARES EM CENTROS DE CIÊNCIA

NON-FORMAL SCIENCE EDUCATION AND SOCIO-EDUCATIONAL ANIMATION: EXPERIENTIAL LEARNING THROUGH CURRICULUM INTERNSHIPS IN SCIENCE CENTERS

DOI: 10.51859/amplla.cte6378-18

Fernando José Sadio-Ramos [1]

[1] Professor/ Investigador na Universidade Politécnica de Coimbra e investigador no Instituto de Estudos Filosóficos da Universidade de Coimbra.

RESUMO

Enquadramento: A educação científica não formal desempenha um papel fundamental no cultivo da literacia científica e na participação de diversos públicos ao longo de todo o espetro da aprendizagem ao longo da vida. Objetivo: Este artigo examina a integração da Animação Socioeducativa em centros de ciência não formal, analisando o modo como os estágios curriculares estruturados fazem a ponte entre a formação académica e a profissionalização institucional. Conceção/Metodologia: Utilizando uma abordagem de estudo de caso empírico, este estudo avalia o modelo SeCApS (*Sustentabilidade Curricular e Aprendizagem em Serviço*) aplicado durante um estágio supervisionado pela Universidade no Exploratório – Centro Ciência Viva de Coimbra, em Portugal. Resultados: Os resultados quantitativos e qualitativos demonstram que a divulgação científica ativa e orientada por narrativas (*Explorastórias*) melhora significativamente o envolvimento cognitivo entre crianças e jovens. Além disso, a abordagem de aprendizagem baseada na comunidade (*service-learning*) facilitou a transição profissional do estagiário para um contrato de trabalho a tempo inteiro na instituição. Conclusões: Alinhar a animação socioeducativa com iniciativas STEAM (Ciência, Tecnologia, Engenharia, Artes e Matemática) não formal potencia o envolvimento comunitário, valida a aprendizagem baseada no serviço de cariz holístico e otimiza os percursos de empregabilidade para os educadores.

Palavras-chave: Aprendizagem experiencial, educação científica não formal, literacia científica, animação socioeducativa, educação STEAM.

ABSTRACT

Background: Non-formal science education plays a pivotal role in cultivating scientific literacy and engaging diverse public demographics across lifelong learning spectrums. Purpose: This article examines the integration of Socio-Educational Animation within non-formal science centers, analyzing how structured curricular internships bridge academic training and institutional professionalization. Design/Methodology: Utilizing an empirical case study approach, this study evaluates the SeCApS framework (*Curricular Sustainability and Sercie Learning*) applied during a university-supervised internship at the *Exploratório - Centro Ciência Viva de Coimbra* in Portugal. Findings: Quantitative and qualitative findings demonstrate that active, story-driven science outreach (*Explorastórias*) significantly enhances cognitive engagement among children and youth. Furthermore, the service-learning approach facilitated the intern's professional transition into full-time institutional employment. Conclusions: Aligning socio-educational animation with non-formal STEAM initiatives enhances community engagement, validates holistic service-learning, and optimizes employability pathways for educators.

Keywords: Experiential learning, non-formal science education, Scientific literacy, Socio-educational animation, STEAM education.

1. INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO TEÓRICO

1.1. EDUCAÇÃO STEAM E LITERACIA CIENTÍFICA AO LONGO DA VIDA

Nas sociedades contemporâneas orientadas pelo conhecimento, a literacia científica evoluiu de um ativo académico para um pré-requisito fundamental para a participação cívica ativa. Conforme definida pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE, 2003), a literacia científica abrange a capacidade de utilizar o conhecimento científico, identificar perguntas cruciais e extrair conclusões baseadas em evidências para compreender e tomar decisões relativas ao mundo natural e às transformações induzidas pelo ser humano. O desenvolvimento de uma cidadania cientificamente literata requer modelos pedagógicos que transcendam a tradicional memorização mecânica, enfatizando o pensamento crítico, a resolução de problemas e a integração interdisciplinar.

A transição do modelo tradicional STEM (Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática) para o STEAM — que incorpora explicitamente as Artes e as Humanidades — representa uma mudança de paradigma na comunicação e educação científicas. A incorporação de dimensões artísticas, narrativas e socioculturais na investigação científica humaniza conceitos científicos complexos, promovendo a exploração criativa e o envolvimento emocional. Vogt (2003) sublinha que o desenvolvimento científico é fundamentalmente um processo cultural, que requer mecanismos dinâmicos de disseminação social e de envolvimento público. A cultura científica, portanto, não é meramente um repositório de factos, mas sim um diálogo ativo e contínuo entre investigadores, educadores e o público (Pérez Gómez, 2001; Vogt, 2003).

A educação científica deve ser inclusiva e decorrer ao longo da vida, alcançando os indivíduos em todas as etapas de desenvolvimento:

Crianças (Primeira Infância e Ensino Básico): A exposição precoce a fenómenos científicos estimula a curiosidade inata, estabelecendo estruturas cognitivas fundamentais para o raciocínio lógico, a perceção espacial e a aprendizagem baseada na investigação.

Jovens (Ensino Secundário e Adolescência): A experimentação prática e a resolução de problemas do mundo real contrariam o desinvestimento académico, contextualizando conceitos teóricos dentro de desafios societais e ambientais.

- **Adultos e Seniores:** As oportunidades de aprendizagem não formal ao longo da vida promovem o envelhecimento ativo, a agilidade cognitiva e a tomada de decisões informadas sobre saúde pública, tecnologia e política ambiental.

1.2. O PAPEL DOS CONTEXTOS EDUCATIVOS NÃO FORMAIS

Enquanto os sistemas de educação formal aderem a currículos estruturados e avaliações padronizadas, os contextos educativos não formais — tais como centros de ciência interativos, museus e planetários — proporcionam ambientes de aprendizagem experiencial abertos. Como observa Proctor (1973), os centros culturais modernos cumprem um duplo imperativo: estimular a curiosidade do visitante e despertar a paixão pela investigação pessoal autónoma.

A educação não formal opera através de metodologias flexíveis e centradas no aprendente, que permitem aos indivíduos interagir com fenómenos científicos de acordo com os seus interesses e grau de prontidão para o desenvolvimento. De acordo com Falk e Dierking (2000), a aprendizagem nos centros de ciência ocorre na interseção de três contextos distintos:

- **Contexto Pessoal:** Abrangendo o conhecimento prévio do visitante, as suas motivações, interesses e antecedentes socioemocionais (Falk & Dierking, 2000).
- **Contexto Físico:** Abrangendo a arquitetura, os módulos interativos, o design espacial e as affordances sensoriais do espaço de exposição (Falk & Dierking, 2000).
- **Contexto Social:** Abrangendo as interações colaborativas, as trocas sócio-verbais e as experiências partilhadas entre visitantes, pares, membros da família e facilitadores educativos (Falk & Dierking, 2000; Sabbatini, 2003).

Ao desconstruir a regra museológica tradicional do "proibido tocar", os centros de ciência interativos incentivam a manipulação tátil, a experimentação iterativa e a descoberta baseada no brincar (Cuesta et al., 2002; Gil, 1989). Gil (1989) enfatiza que os centros de ciência organizam exposições especificamente para o envolvimento pedagógico, garantindo que os módulos interativos demonstrem ligações interdisciplinares em detrimento de fenómenos isolados. Consequentemente, os centros de ciência não formal servem de pontes cruciais

entre os princípios científicos abstratos e as experiências humanas quotidianas (Cuesta et al., 2002; Sabbatini, 2003).

2. CONTEXTO INSTITUCIONAL: EXPLORATÓRIO – CENTRO CIÊNCIA VIVA DE COIMBRA

2.1. HISTÓRIA E EVOLUÇÃO

Fundado em 1995 por um grupo visionário de professores universitários, o Exploratório – Centro Ciência Viva de Coimbra detém a distinção de ser o primeiro centro de ciência interativo estabelecido em Portugal. Em 1998, tornou-se a instituição âncora da Rede Ciência Viva nacional, que hoje abrange 20 centros em todo o país. Declarado associação privada sem fins lucrativos de utilidade pública em 2000, o Exploratório ocupa uma instalação de 2.500 metros quadrados situada no Parque Verde do Mondego, em Coimbra.

Um marco importante ocorreu em 2015 com a inauguração de um moderno pavilhão de exposições, que inclui a exposição permanente *Em Forma com a Ciência*, um teatro de projeção hemisférica a 360 graus avançado (*Hemispherium*) e espaços de laboratório especializados. Simultaneamente, a instituição fortaleceu a sua integração com a Universidade de Coimbra, consolidando o seu estatuto de referência regional para a divulgação científica, colaboração com o ensino superior e animação sociocultural.

2.2. IMPACTO INSTITUCIONAL E PROGRAMAS EDUCATIVOS

O Exploratório opera sob dois paradigmas estratégicos fundamentais:

- **"Há Ciência para todos":** Desenvolvimento de programação educativa direcionada e adaptada a grupos etários específicos, incluindo a primeira infância, grupos escolares, famílias intergeracionais e cidadãos seniores.
- **"Levar a Ciência a todos":** Extensão da disseminação científica para além dos limites físicos do museu, alcançando escolas, comunidades rurais e espaços públicos através de iniciativas de ciência itinerante e parcerias territoriais.

A instituição acolhe vários programas educativos permanentes e temporários:

- ***Em Forma com a Ciência:*** Uma exposição interativa permanente dedicada à biologia humana, à saúde e ao bem-estar, estruturada em sete corredores temáticos que ramificam a partir de um modelo central de um cérebro (sistemas pele, musculoesquelético, circulatório, digestivo, respiratório, reprodutor e nervoso).

- ***Hemispherium:*** Um cinema imersivo em cúpula completa (*fulldome*) a 360 graus que apresenta documentários científicos adaptados para diversos públicos, desde bebés (*Astronomia para Bebés*) até jovens e adultos (*Seleção Natural*, *Corpo Humano*).
- ***Explorastórias:*** Um programa socioeducativo de referência que utiliza a literatura infantil como trampolim narrativo para explorar conceitos científicos ocultos através de experiências práticas. Este programa funciona em três modalidades de entrega: Explorastórias para Famílias, Explorastórias para Grupos Escolares e Explorastórias vão à Escola (extensão externa).
- ***Pais não venham cedo:*** Um programa de aprendizagem não formal noturno para jovens dos 6 aos 14 anos, combinando oficinas científicas noturnas, desafios temáticos e socialização entre pares.
- ***A Ciência não vai de férias:*** Campos de férias concebidos para envolver crianças do ensino básico em investigações STEAM imersivas durante as interrupções letivas.

3. ANIMAÇÃO SOCIOEDUCATIVA E INTEGRAÇÃO

3.1. ANIMAÇÃO SOCIOEDUCATIVA E A LICENCIATURA EM ASE

A Animação Socioeducativa (ASE) é um paradigma pedagógico ativo enraizado na Educação Popular europeia do século XIX e na pedagogia social (Besnard, 1991; Ventosa, 2002). Conforme definida por Besnard (1991) e Debesse (1988), a animação socioeducativa constitui uma prática educativa concebida para estimular a autorrealização pessoal, a integração social e o desenvolvimento comunitário através de metodologias participativas. Assenta no princípio antropológico da educabilidade humana — a capacidade de os indivíduos aprenderem, se transformarem e se adaptarem ao longo de toda a sua vida (Debesse, 1988).

A Licenciatura em Animação Socioeducativa da Escola Superior de Educação do Politécnico de Coimbra (ESEC) forma animadores socioeducativos para atuar em três dimensões funcionais interconectadas definidas por Lopes (2008):

- **Animação Cultural:** Utilização de estratégias educativas para promover o envolvimento cultural, a expressão artística e a literacia científica (Ander-Egg, 1992; Lopes, 2008).

- **Animação Social:** Empoderamento dos indivíduos, resposta às necessidades da comunidade e promoção da coesão social (Besnard, 1991; Lopes, 2008).
- **Animação Educativa:** Extensão de intervenções pedagógicas para além da escolaridade formal de modo a fomentar a aprendizagem ao longo da vida, o pensamento crítico e as competências socioemocionais (Debesse, 1988; Lopes, 2008).

3.2. ESTÁGIOS CURRICULARES E INTEGRAÇÃO TERRITORIAL

O plano de estudos da licenciatura em ASE na ESEC está estruturado estrategicamente para promover uma articulação ativa com o meio local, regional e sociocultural. Um pilar central desta integração é o módulo de estágio profissional com a duração de um ano letivo, inserido no último ano do curso. A estrutura de estágio funciona através de um ciclo pedagógico de duas fases:

- **Primeiro Semestre (Conceção do Projeto):** Os estagiários colaboram com supervisores académicos e tutores institucionais para realizar diagnósticos de necessidades, formular enquadramentos teóricos e desenhar planos de intervenção estruturados.
- **Segundo Semestre (Implementação e Avaliação):** Os estagiários executam os seus planos de ação diretamente nas instituições de acolhimento, liderando programas educativos, gerindo grupos, avaliando resultados e refinando abordagens pedagógicas.

Os estágios curriculares servem como canais críticos para a inserção profissional. Para os estudantes, os estágios oferecem oportunidades autênticas de fazer a ponte entre o conhecimento teórico e a execução prática, desenvolver competências de liderança e construir redes profissionais. Para as instituições de acolhimento, os estagiários trazem metodologias inovadoras, rigor académico e apoio educativo dedicado, estabelecendo frequentemente trajetórias profissionais de longo prazo que culminam na empregabilidade pós-graduação.

4. O ENQUADRAMENTO DO PROJETO DE APRENDIZAGEM BASEADA NO SERVIÇO SECAPS

4.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS: O MODELO DE APRENDIZAGEM BASEADA NO SERVIÇO DE ANDREW FURCO

Para maximizar o impacto pedagógico e societal dos estágios socioeducativos, a supervisão académica deste projeto incorporou o modelo SeCApS — um enquadramento de projeto integrativo que sintetiza Serviço (*Service*), Educação (*Education*), Comunidade (*Community*), Autonomia (*Autonomy*), Crescimento Pessoal (*Personal*) e Desenvolvimento Social (*Social*).

Central para o modelo SeCApS é a conceptualização multidimensional da Aprendizagem Baseada no Serviço (*Service-Learning*) de Furco (1996). Furco (1996) distingue a aprendizagem baseada no serviço do voluntariado, do serviço comunitário e dos estágios tradicionais ao enfatizar um duplo foco: proporcionar benefício igual tanto para quem presta o serviço (o estudante) como para quem o recebe (a comunidade), mantendo simultaneamente um equilíbrio intencional entre os objetivos de serviço e os resultados de aprendizagem.

No âmbito do enquadramento SeCApS aplicado no Exploratório, a noção de "Serviço" opera através de dimensões multidirecionais (Furco, 1996):

- **Serviço à Comunidade em Geral:** Promoção da literacia científica pública, do acesso democrático ao conhecimento e da inclusão social.
- **Serviço aos Participantes Diretos:** Proção de experiências STEAM práticas, cativantes e de alta qualidade para crianças, grupos escolares e famílias.
- **Serviço à Instituição de Acolhimento:** Contributo para a conceção de programas, geração de recursos, preparação de exposições e apoio operacional.
- **Serviço a Si Próprio (O Estagiário):** Fomento da identidade profissional, agência pessoal, competência pedagógica e maturidade emocional através da prática reflexiva.

5. ANÁLISE DE ESTUDO DE CASO: IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO DE ESTÁGIO E RESULTADOS

5.1. CONTEXTO, OBJETIVOS E LINHAS DE AÇÃO DO PROJETO

O núcleo empírico deste estudo analisa um estágio curricular de ASE do último ano realizado no Exploratório – Centro Ciência Viva de Coimbra, sob supervisão académica. O projeto de estágio, intitulado "Envolve-te na Ciência", teve como objetivo potenciar o envolvimento público com a cultura científica através de metodologias de animação socioeducativa.

Objetivos Gerais:

- Promover o envolvimento direto e ativo entre os públicos jovens e os fenómenos científicos de modo a cultivar a curiosidade ao longo da vida.
- Promover a cultura e a literacia científicas em ambientes educativos não formais.

Objetivos Específicos:

- Conceber e publicar guias de exploração pedagógica para prolongar a aprendizagem para além das visitas ao centro.
- Facilitar oficinas STEAM interativas e experiências baseadas em narrativas destinadas a alunos da educação pré-escolar e do ensino básico.
- Desenvolver práticas pedagógicas autónomas, competências de oratória e técnicas de facilitação de grupos.

A intervenção estruturou-se em redor de duas linhas de ação operacionais complementares: Linha de Ação 1 (Contacto Indireto através de guias de exploração) e Linha de Ação 2 (Contacto Direto através da facilitação de oficinas).

5.2. LINHA DE AÇÃO 1: CONTACTO PÚBLICO INDIRETO – GUIAS DE EXPLORAÇÃO PEDAGÓGICA

Para assegurar a continuidade pedagógica após as visitas de extensão escolar, o estagiário colaborou com as equipas institucionais na conceção de oito guias de exploração estruturados para o programa *Explorastórias vão à Escola*. Estes livretos servem como extensões físicas de aprendizagem que os alunos levam para casa ou utilizam nas salas de aula com professores e pais.

O fluxo de trabalho de desenvolvimento seguiu um rigoroso processo de validação institucional em seis etapas: formulação da atividade, redação, validação pela direção institucional, revisão editorial, paginação digital e design gráfico/impressão.

Os oito guias de exploração criados atenderam a dois patamares educativos distintos:

- **Pré-escolar (Idades 3–5):** *Ivo Neto, Arquiteto* (engenharia/arquitetura); *O meu balão vermelho* (pressão do ar/física); *Pequeno Azul e Pequeno Amarelo* (mistura de cores/propriedades cromáticas).
- **Ensino Básico (Idades 6–9):** *365 Pinguins* (matemática/biologia polar); *Adivinha quanto eu gosto de ti* (medicação/unidades); *Como é que uma galinha...* (embriologia/biologia); *Espelho* (ótica/reflexão da luz); *Uma última carta* (criptografia/química).

5.3. LINHA DE AÇÃO 2: CONTACTO PÚBLICO DIRETO – IMPLEMENTAÇÃO PEDAGÓGICA STEAM

Na linha de contacto direto, o estagiário facilitou ativamente oficinas interativas em múltiplos programas institucionais:

Implementações do Programa Explorastórias

- ***Artur*** **(Embriologia e Conservação de Espécies):** As crianças observaram vídeos do desenvolvimento de embriões de pintainho aos 21 dias, manusearam pintos recém-e eclodidos da incubadora do centro, examinaram diversos ovos de aves e participaram num jogo de seleção natural que simulava dinâmicas predador-presa e estratégias de sobrevivência.
- ***O meu balão vermelho*** **(Física da Pressão e Fricção):** Os alunos realizaram experiências práticas de física, incluindo demonstrações de espetos a atravessar balões (utilizando pontos de tensão e lubrificante de superfície) e testes de distribuição de peso equilibrando-se sobre balões assentes numa cama de 100 pregos sem que estes rebentassem.
- ***Uma última carta*** **(Mensagens Secretas e Reações Químicas):** Os participantes exploraram comunicações históricas escrevendo mensagens invisíveis com reagentes orgânicos (sumo de limão, leite) e revelando-as através de oxidação térmica em fornos de laboratório especializados ou polvilhamento com grafite.
- ***Os de cima e os de baixo*** **(Gravidade, Física Hemisférica e Movimento Rotacional):** Utilizando projeções em cúpula completa no *Hemispherium*, os

alunos exploraram a geografia global, a atração da gravidade, a dinâmica rotacional com porcas em copos giratórios e variações térmicas medidas através de termómetros analógicos e digitais.

- ***O senhor cavalo-marinho* (Biologia Marinha e Ótica):** Os participantes examinaram adaptações da vida marinha, construíram taumatropos de ilusão ótica, exploraram a flutuabilidade utilizando cavalos-marinhos artificiais com vesículas de ar e realizaram experiências de pesca no gelo utilizando cloreto de sódio para baixar os pontos de congelação.

Programas Noturnos e de Férias

- ***Pais não venham cedo* ("Brilha... brilha... no escuro"):** O estagiário cofacilitou oficinas noturnas focadas na luminescência. As atividades incluíram a construção de candeeiros de lava fluorescentes (combinando água, corante alimentar, óleo mineral e comprimidos efervescentes), a criação de trabalhos artísticos reativos a UV e a exploração da quimioluminescência utilizando bastões de luz durante eventos sociais.
- ***A Ciência não vai de férias... de Páscoa!:*** Durante os campos de férias de duas semanas, o estagiário facilitou oficinas STEAM diárias, desafios de física de reação em cadeia utilizando redes de paus de gelado, construções de engenharia KNEX e amostragem ecológica ao ar livre em espaços arborizados vizinhos.

5.4. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO E RESULTADOS DE INSERÇÃO PROFISSIONAL

A avaliação de intervenções socioeducativas não formais requer métodos flexíveis e qualitativos adaptados a fluxos dinâmicos de visitantes. Dadas as restrições de tempo das sessões, a avaliação centrou-se na observação direta, no diálogo com os participantes e no feedback dos pares (Lopes, 2008):

- **Reflexão Interativa:** Perguntas formativas no final das sessões avaliaram a retenção cognitiva, o agrado dos participantes e a disposição para replicar as experiências em casa.

- **Dinâmicas Observacionais:** Avaliação do envolvimento emocional, da colaboração entre pares e da investigação autodirigida durante as atividades práticas.
- **Supervisão Institucional:** Reuniões regulares de reflexão conjunta com supervisores académicos e tutores institucionais para avaliar o desempenho pedagógico, as competências de gestão de grupo e a adaptabilidade.

A métrica final de sucesso deste estágio e do modelo SeCApS foi a bem-sucedida inserção profissional do estudante. Após a conclusão do estágio e a graduação na licenciatura em Animação Socioeducativa, o estagiário foi formalmente contratado pelo Exploratório – Centro Ciência Viva de Coimbra como membro do pessoal a tempo inteiro. Esta contratação demonstra os benefícios mútuos dos estágios estruturados: a instituição obteve um educador altamente qualificado e dedicado, familiarizado com a sua cultura operacional, enquanto o diplomado garantiu um emprego imediato e alinhado com a sua área de formação.

6. CONCLUSÃO GERAL

Os centros de ciência não formal servem de espaços catalisadores vitais para democratizar o conhecimento científico e nutrir a literacia científica ao longo da vida (Falk & Dierking, 2000; Vogt, 2003). Conforme demonstrado através do estudo de caso do Exploratório – Centro Ciência Viva de Coimbra, a integração da Animação Socioeducativa (ASE) na educação STEAM transforma a visita passiva ao museu numa descoberta experiencial ativa, orientada por narrativas (Besnard, 1991; Cuesta et al., 2002).

O enquadramento de projeto SeCApS, ancorado nos princípios de aprendizagem baseada no serviço de Furco (1996), prova que os estágios universitários podem transcender a formação transacional tradicional. Ao alinhar os objetivos de aprendizagem com o serviço comunitário multidimensional, os estágios promovem a agência profissional, geram recursos educativos tangíveis e estabelecem canais de talentos sustentáveis para as instituições culturais.

A transição documentada do estagiário de estudante universitário supervisionado a animador científico profissional a tempo inteiro valida a eficácia pedagógica e operacional desta abordagem. As instituições de ensino superior e as organizações educativas não formais devem continuar a fortalecer os enquadramentos de estágio colaborativo, reconhecendo a

animação socioeducativa como uma ferramenta indispensável para o envolvimento público com a ciência, o desenvolvimento comunitário e a inserção profissional.

REFERÊNCIAS

Ander-Egg, E. (1992). Metodología y práctica de la Animación Socio-cultural. Humanitas.

Besnard, P. (1991). La animación sociocultural. Paidós.

Cuesta, M., Diaz, M., Echevarría, I., & Morentin, M. (2002). Centros interactivos de Ciência: Su papel en el aprendizaje de la Física. In Aspectos Didácticos de Física y Química. Instituto de Ciencias Educativas, Universidade de Zaragoza.

Debesse, M. (1988). La animación sociocultural. Oikos-tau.

Falk, J. H., & Dierking, L. D. (2000). Learning from museums: Visitor experiences and the making of meaning. AltaMira Press.

Furco, A. (1996). Service-learning: A balanced approach to experiential education. Expanding Boundaries: Serving and Learning, 1(1), 2–6.

Gil, F. (1989). Museus de Ciência – preparação do futuro, memória do passado. Ciências, 3, 72–89.

Laugksch, R. C. (2000). Scientific literacy: A conceptual overview. Science Education, 84(1), 71–94.

Lopes, M. (2008). Animação Sociocultural em Portugal. Intervenção.

OCDE. (2003). The PISA 2003 Assessment Framework: Mathematics, reading, science and problem solving knowledge and skills. OECD Publishing.

Pérez Gómez, A. I. (2001). A cultura escolar na sociedade neoliberal. Artmed.

Proctor, D. (1973). Musées, enseignants, étudiants, enfants. In Musées, imagination et Éducation (pp. 25–32). UNESCO.

Sabbatini, M. (2003). Museus e centros de ciência virtuais: uma nova fronteira para a cultura científica. Com Ciência, 47.

Ventosa, V. J. (2002). Fuentes de la Animación Sociocultural en Europa. Editorial CCS.

Vogt, C. (2003). A espiral da cultura científica. Com Ciência, 44.

9 786553 813878