ENGENHARIA: A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XXVII



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Plínio Ferreira Pires

Engenharia: a máquina que constrói o futuro

27ª ed.

Goiânia-GO
Editora Conhecimento Livre

Copyright© 2026 por Editora Conhecimento Livre

27ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Pires, Plínio Ferreira
P638E Engenharia: a máquina que constrói o futuro

/ Plínio Ferreira Pires. – Goiânia-GO

Editora Conhecimento Livre, 2026

571 f.: il
DOI: 10.37423/2026.edcl1337
ISBN: 978-65-5367-831-6
Modo de acesso: World Wide Web
Incluir Bibliografia

1. desenvolvimento 2. projeto 3. construção I. Pires, Plínio Ferreira II. Título

CDU: 620

https://doi.org/10.37423/2026.edcl1337

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Conselho Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

Dr. Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

Dra. Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

Dr. Rodrigo Couto Santos

Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos

Editora Conhecimento Livre
Goiânia-GO
2026

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 8
ENTRE LAGOAS, URBANIZAÇÃO E SANEAMENTO: DESAFIOS AMBIENTAIS E TECNOLÓGICOS NO TRATAMENTO DESCENTRALIZADO DE ESGOTOS
Phillipe Rocha Silva
André Luís de Sá Salomão
DOI 10.37423/260811293

CAPÍTULO 2 19
ORIGEM E FUNDAMENTOS DE IOT (INTERNET OF THINGS)
Roger Oliva Felix
DOI 10.37423/260911336

CAPÍTULO 3 33
O PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO EM PROJETO COM RESTRIÇÃO DE RECURSO APLICADO NA GESTÃO DE QUALIDADE NO ATENDIMENTO DE UM CALL CENTER
Lais Rivelli Matoso
Clarisse da Silva Vieira
DOI 10.37423/260911338

CAPÍTULO 4 50
ADERÊNCIA E ESTABILIDADE DE FILMES DE CNTS EM AÇO SAE 1020 VIA DEPOSIÇÃO ELETROFORÉTICA
Emanuel Silva de Oliveira
Geanni Barbosa da Silveira e Silva Pessanha
Max Erik Soffner
Layzza Tardin da Silva Soffner
DOI 10.37423/260911340

CAPÍTULO 5 78
TRITURAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS OFFSHORE: DESAFIOS PARA A RECICLAGEM E A SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS
Isabela Fernandes de Oliveira
Laís Bubach Carvalho Simão
Beatriz Bandeira dos Santos
Fernanda Rodrigues Lago
Ana Tereza Marques Parente
Marcelo Igor Lourenço de Souza
DOI 10.37423/260911341

CAPÍTULO 6 96
DESCOMISSIONAMENTO OFFSHORE NO SETOR DE ÓLEO E GÁS: DIRETRIZES PARA UM GUIA ESTRUTURADO
Fernanda Rodrigues Lago
Laurelena Crescencio Palhano Afonso Silveira
Pedro Augusto Muylaert Reis Pessanha
Erika Pereira Venturini Cortes
DOI 10.37423/260911346

CAPÍTULO 7 123
MODELOS DE LOGÍSTICA INVERSA Y ECONOMÍA CIRCULAR PARA RESIDUOS ELECTRÓNICOS: REVISIÓN Y DISEÑO DE REDES INVERSAS ENTRE COLOMBIA Y BRASIL
Juan Miguel Castaño
DOI 10.37423/260911349

CAPÍTULO 8 151
ANÁLISE DA REDUÇÃO DE ARRASTO EM FÍSTULAS ARTERIOVENOSAS COM APLICAÇÃO DEPOLÍMEROS: EFEITOS DO PEO E DA ALOE VERA
Jonhattan Ferreira Rangel
Willyam Brito de Almeida Santos
Angélica Aline Campelo Gomes
André Menezes de Freitas Vale
Kleiber Lima de Bessa
Amanda Melissa Damião Leite Lins
DOI 10.37423/260911353

CAPÍTULO 9 163
SUSTENTABILIDADE E DESENVOLVIMENTO NO BRICS: O EQUILÍBRIO ENTRE OS PILARES ECONÔMICO, SOCIAL E AMBIENTAL
Lívia Adriana Costa Estevam da Silva
Daiane Rodrigues dos Santos
Alexis Toríbio Dantas
DOI 10.37423/260911358

CAPÍTULO 10 190
GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS: UMA ABORDAGEM ECONÔMICO-AMBIENTAL
Rafaella de Deus Panassolo
Sandro Medice De Oliveira
Andrea Teresa Riccio Barbosa
DOI 10.37423/260911372

CAPÍTULO 11 205
PRECIFICAÇÃO DE OPÇÕES E CALIBRAÇÃO DE VOLATILIDADE IMPLÍCITANO MERCADO BRASILEIRO USANDO REDES NEURAIS INFORMADAS PELA FÍSICA (PINNS)
Rubens Molina Loures do Nascimento
Vahid Nikoofard
DOI 10.37423/260911392

CAPÍTULO 12 232
O LEAN HELTHCARE E A ACREDITAÇÃO HOSPITALAR ONA
Evandro Willians Wicher
Marcos Alberto Claudio Pandolfi
DOI 10.37423/260911395

CAPÍTULO 13 252
INTEGRAÇÃO DE ANÁLISES ESTRUTURAIS, DINÂMICAS E ERGONÔMICAS NO PROJETO DE UM VEÍCULO OFF-ROAD BAJA SAE
Heron de Lima Gomes e Martins
DOI 10.37423/260911396

CAPÍTULO 14 274
AS TENDÊNCIAS E DISSONÂNCIAS DA INDÚSTRIA 4.0 NO S&OP DA MANUFATURA ADITIVA DE METAIS: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E PANORAMA CIENTÍFICO (2014-2025)
Ana Carolina Melega Duarte de Oliveira
Antonio Carlos Pacagnella Junior
Paulo Sérgio de Arruda Ignácio
Rodrigo José Contieri
DOI 10.37423/260911397

CAPÍTULO 15 309
APLICAÇÃO DA SEQUÊNCIA DE FIBONACCI EM ESTIMATIVAS DE ESFORÇO: ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DE CONSULTORIA EM GESTÃO DE PROJETOS
Ana Nívia Paulino de Lima
Jailson Ribeiro de Oliveira
DOI 10.37423/260911398

CAPÍTULO 16 321
PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA BORRA DE CAFÉ PARA REMOÇÃO DA COLORAÇÃO DA ÁGUA DA LAGOA DO PARQUE IPANEMA
Gabriel Guilherme Soares de Oliveira
Beatriz de Sena Siqueira
Hebert Coura Santiago
Lorran Augusto Bernardino Neves
Pedro Henrique Villela Alves
Flávia Souza Pio
DOI 10.37423/260911401

CAPÍTULO 17 345
USO DOS GÊMEOS DIGITAIS APLICADOS NO SETOR PORTUÁRIO NO BRASIL
Agustin Enrique Cuevas Fernandez
Carlos Cugnasca
DOI 10.37423/260911410

CAPÍTULO 18 365
UMA ABORDAGEM BASEADA EM MODELOS DO TIPO COSMO PARA PREDIÇÃO DA VISCOSIDADE CINEMÁTICA EM SISTEMAS MULTICOMPONENTES: APLICAÇÃO AO BIODIESEL
Gabriel Oliveira da Silva
Julio Lopes da Silva Junior
DOI 10.37423/260911414

CAPÍTULO 19 388
DESENVOLVIMENTO DE LICOR UTILIZANDO A FRUTA PITAYA
Bernardo Genti Schimidt
Gabriel Fante
Gustavo Henrique Bazi
Regnier Antonio Rodriguez Marcano
Murilo Heitor Ahlert
DOI 10.37423/260911415

CAPÍTULO 20 406
A CADEIA DO PETRÓLEO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA PROCESSOS, IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS E PERSPECTIVAS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
Calisto Nonato Silva Junior
Yasmin Nascimento da Silva
Vera Lucia da Silva Farias
Adriana Cristina Silva
Glauco Antônio de Queiroz Filho
DOI 10.37423/260911418

CAPÍTULO 21 434
RACIOCÍNIO FÍSICO E CONSTRUÇÃO DE MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA NA FORMAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
Calisto Nonato Silva Junior
Ana Paula de Oliveira Schmitz
André Zuber
DOI 10.37423/260911419

CAPÍTULO 22 458
UTILIZAÇÃO DE OBJETOS DE APRENDIZAGEM NO ENSINO DA MANUFATURA ADITIVA NA ERA DA INDÚSTRIA 4.0
DAVI DE ALBUQUERQUE GOMES
JOEL PORTO ALVES
LEANDRO CIGANO DE SOUZA THOMAS
MARCOS DONIZETE DE SOUSA
RODRIGO FRANCO GONÇALVES
DOI 10.37423/260911444

CAPÍTULO 23 479
VERTICALIZAÇÃO DE ARMAZENAGEM EM INDÚSTRIA GRÁFICA: IMPACTOS NA EFICIÊNCIA OPERACIONAL
Elisson Charles
Jailson Ribeiro
Elinaldo Charles
Andrea Kelly
DOI 10.37423/260911446

CAPÍTULO 24 492
BIOMETANO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA BRASILEIRA
Calisto Nonato SilvaJunior
Fernanda Calioni Schmainski
Luiz Gustavo Schneider
Fernanda R. de Almeida Cordeiro de Gois
Wagner Da Silveira
DOI 10.37423/260911447

CAPÍTULO 25 512
OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL E PROJETO DOS SISTEMAS HIDRÁULICO E ELÉTRICO DE UMA PLATAFORMA DE ELEVAÇÃO VERTICAL PARA CADEIRANTES
Diodato Ferreira Das Neves Neto
Luan Cosmo Ferreira
Martiliano Soares Filho
Leonardo Pereira de Lucena Silva
Edleusom Saraiva da Silva
DOI 10.37423/260911450

CAPÍTULO 26 543
ENGENHARIA KANSEI E IA GENERATIVA: ESTRATÉGIAS PARA A PRODUÇÃO DE EXPERIÊNCIAS DIGITAIS HIPERPERSONALIZADAS
JOÃO PEDRO PINHEIRO DE OLIVEIRA DA MOTA BARROS
João Pinheiro de Barros Neto
DOI 10.37423/260911451

CAPÍTULO 27 561
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO DE FILMES FINOS DE LIGAS FEMN.
Pedro Brito de Souza
Arthur De Farias Silva Rente
Ronald Borges Dos Reis
Yan Yago Da Silva De Andrade
Giovanna Mayssa Pinheiro Costa
DOI 10.37423/260911452

Capítulo 1

10.37423/260811293

ENTRE LAGOAS, URBANIZAÇÃO E SANEAMENTO: DESAFIOS AMBIENTAIS E TECNOLÓGICOS NO TRATAMENTO DESCENTRALIZADO DE ESGOTOS

Phillipe Rocha Silva

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

André Luís de Sá Salomão

andre@andresalomao.com



1 SANEAMENTO AMBIENTAL E SAÚDE PÚBLICA

O saneamento ambiental constitui um dos pilares estruturais das sociedades contemporâneas, envolvendo dimensões técnicas, sociais, econômicas, urbanísticas e ambientais (JACOB et al., 2024). O termo “saneamento” deriva da ideia de sanar, restaurar ou preservar condições adequadas de salubridade, estando historicamente associado à promoção da saúde e à prevenção de doenças. Nesse sentido, organismos internacionais, como a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2018), compreendem o saneamento como elemento indispensável e determinante para a manutenção do bem-estar físico, mental e social das populações e suas sociedades.

Ao longo do século XX, os conceitos de saneamento básico e saneamento ambiental passaram a ser utilizados de forma complementar. O saneamento básico consolidou-se como a estrutura mínima de serviços voltados ao abastecimento de água, esgotamento sanitário, drenagem urbana e manejo de resíduos sólidos. Em adendo, o saneamento ambiental ampliou esse entendimento ao incorporar aspectos relacionados ao equilíbrio ecológico, ao controle da poluição ambiental, ao uso e ocupação do solo e à qualidade de vida nas cidades (PHILIPPI JR & SILVEIRA, 2004).

Essa ampliação conceitual permitiu compreender que a ausência de infraestrutura sanitária não produz apenas impactos diretos sobre a saúde humana, mas também efeitos profundos sobre os ecossistemas urbanos (CUNHA et al., 2025a). A contaminação dos corpos hídricos, a proliferação de vetores, a degradação da paisagem urbana e a perda da qualidade ambiental são consequências recorrentes da deficiência dos serviços de saneamento (CUNHA et al., 2025b). Assim, a discussão contemporânea sobre saneamento transcende o campo estritamente operacional e passa a dialogar diretamente com os princípios da sustentabilidade urbana e da justiça socioambiental.

No contexto brasileiro, a universalização do saneamento permanece como um desafio estrutural. Apesar dos avanços regulatórios e institucionais observados nas últimas décadas, ainda existem extensas áreas urbanas sem coleta e tratamento adequados de esgotos, sobretudo em regiões periféricas e em áreas de expansão imobiliária acelerada (JACOB et al., 2024). O saneamento básico e mais especificamente, o esgotamento sanitário na cidade do Rio de Janeiro apresenta índices médios de coleta de esgoto de 58,63% e de tratamento de esgoto em 73,22% (SNIS, 2018). Essa realidade evidencia a necessidade de políticas públicas integradas que sejam capazes de compatibilizar crescimento urbano, preservação ambiental e infraestrutura sanitária (SILVA JUNIOR et al., 2022).

2 ESGOTOS DOMÉSTICOS E CARACTERÍSTICAS CONTAMINANTES DOS EFLUENTES

Os esgotos domésticos podem ser compreendidos como águas residuais provenientes das atividades humanas cotidianas, incluindo usos residenciais, comerciais e institucionais. Sua composição é predominantemente hídrica, embora contenha significativa carga de matéria orgânica, nutrientes, sólidos suspensos, microrganismos patogênicos e compostos químicos diversos (BASSOI & GAUZELLI, 2010; SANTOS & JORDÃO, 2021).

Entre os parâmetros tradicionalmente monitorados destacam-se a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), a Demanda Química de Oxigênio (DQO), o Nitrogênio Total, o Fósforo Total, os sólidos suspensos e os indicadores microbiológicos de contaminação fecal (PEREIRA; BOTTREL; BILA, 2021; JORDÃO & PESSÔA, 2005; VON SPERLING, 1996).

A elevada carga orgânica presente nos esgotos domésticos favorece processos de consumo de oxigênio dissolvido nos corpos receptores, comprometendo a vida aquática e a capacidade de autodepuração dos ecossistemas (VON SPERLING, 1996; LA ROVERE et al., 2002). Da mesma forma, nutrientes como nitrogênio e fósforo contribuem diretamente para a eutrofização de lagoas, rios e reservatórios, intensificando florações de algas e macrófitas aquáticas (VON SPERLING, 1996; PEREIRA; BOTTREL; BILA, 2021).

Além dos impactos químicos e biológicos, os esgotos também carregam sólidos sedimentáveis, óleos, graxas e surfactantes, alterando características físicas como cor, odor e turbidez das águas receptoras (JORDÃO & PESSÔA, 2005; VON SPERLING, 1996). Não obstante, há ainda em último grau, o aporte de contaminantes emergentes oriundos dos compostos fármacos, cujos efeitos vêm sendo estudados mais recentemente (BILA & DEZOTTI, 2003; SOUZA et al., 2020; SOUZA et al., 2021). Em áreas urbanas densamente ocupadas, a deficiência dos sistemas de coleta e tratamento intensifica a degradação dos recursos hídricos e potencializa riscos sanitários associados às doenças de veiculação hídrica.

Dessa forma, o correto monitoramento e controle dos esgotos sanitários exige não apenas infraestrutura de coleta e transporte, mas também sistemas de tratamento capazes de reduzir adequadamente as cargas poluidoras antes do lançamento nos corpos hídricos (RABELLO et al., 2019).

3 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS E SUAS TECNOLOGIAS

As Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) desempenham papel fundamental na mitigação dos impactos ambientais decorrentes do lançamento de efluentes sanitários. Esses sistemas podem assumir diferentes configurações tecnológicas, variando conforme a população atendida, a disponibilidade de área, os recursos financeiros e os padrões legais exigidos para lançamento (JACOB et al., 2024; RABELLO et al., 2019; SILVA JUNIOR et al., 2022).

Os processos de tratamento costumam ser divididos em etapas preliminares, primárias, secundárias e terciárias. As fases preliminares e primárias concentram-se predominantemente na remoção física de sólidos grosseiros e sedimentáveis. Já o tratamento secundário utiliza processos biológicos aeróbios ou anaeróbios para reduzir a matéria orgânica biodegradável presente no esgoto (HONORATO et al., 2021; JORDÃO & PESSÔA, 2005).

Entre as tecnologias amplamente utilizadas destacam-se os reatores anaeróbios do tipo UASB, os sistemas de lodos ativados, filtros biológicos e combinações híbridas envolvendo reatores anaeróbios seguidos de pós-tratamentos aeróbios. Em sistemas descentralizados, especialmente em condomínios residenciais e empreendimentos urbanos afastados da rede pública, soluções compostas por fossas sépticas, filtros anaeróbios e reatores compactos são frequentemente adotadas (CHERNICHARO, 2007).

As tecnologias descentralizadas assumem relevância estratégica em regiões urbanas marcadas pela insuficiência da rede pública de esgotamento sanitário. Nessas áreas, os sistemas particulares tornam-se responsáveis diretos pelo tratamento dos efluentes gerados por condomínios, centros comerciais e conjuntos habitacionais (HONORATO et al., 2021). Entretanto, a eficiência desses sistemas depende fortemente de operação adequada, manutenção contínua e monitoramento sistemático dos parâmetros de controle (JACOB et al., 2024; SILVA JUNIOR et al., 2022; LA ROVERE, 2002).

A literatura técnica demonstra que sistemas bem operados podem alcançar elevadas taxas de remoção de DBO e sólidos suspensos, como 60-80% para Reatores Anaeróbios e 40-98% para Lodos Ativados por Aeração Prolongada (VON SPERLING, 1996; LA ROVERE, 2002). Contudo, a remoção de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, ainda representa um desafio relevante para diversas configurações simplificadas de tratamento (RABELLO et al., 2019). Isso se torna particularmente crítico em regiões ambientalmente sensíveis, onde o aporte contínuo desses compostos acelera processos de eutrofização (JACOB et al., 2024; SILVA JUNIOR et al., 2022; METCALF & EDDY, 2016).

4 EXPANSÃO URBANA, SANEAMENTO E OCUPAÇÃO DA BARRA DA TIJUCA

A Região Administrativa da Barra da Tijuca, localizada na zona oeste do município do Rio de Janeiro, constitui um dos exemplos mais emblemáticos da relação contraditória entre expansão urbana acelerada e insuficiência de infraestrutura sanitária (CUNHA et al., 2025a). Composta pelos bairros da Barra da Tijuca, Recreio dos Bandeirantes, Camorim, Itanhangá, Joá, Grumari, Vargem Grande e Vargem Pequena, a região experimentou intenso crescimento imobiliário a partir da década de 1970 (SILVA, 2006).

Esse processo de urbanização foi impulsionado por grandes investimentos públicos e privados voltados à expansão viária, ao desenvolvimento habitacional e à valorização imobiliária da região. Entretanto, a implantação da infraestrutura de esgotamento sanitário não acompanhou o mesmo ritmo das transformações urbanas observadas (CUNHA et al., 2025a; MENDES & BARCELLOS, 2015).

Como consequência, diversos empreendimentos passaram a depender de sistemas particulares de tratamento de esgoto para obtenção de licenciamento e emissão de habite-se. Assim, as ETEs descentralizadas tornaram-se componentes estruturais do modelo de ocupação urbana da região (SILVA, 2006).

Paralelamente à expansão formal do mercado imobiliário, verificou-se também o crescimento de aglomerados subnormais e ocupações irregulares em áreas ambientalmente frágeis, incluindo margens de rios, canais e lagoas. A ausência de coleta adequada de esgoto nessas áreas contribuiu significativamente para a degradação dos corpos hídricos da região (KOIFMAN et al., 2026; CUNHA et al., 2025a; MENDES & BARCELLOS, 2015).

O caso da Barra da Tijuca evidencia como a valorização estética e imobiliária de determinadas áreas urbanas pode coexistir com profundas deficiências ambientais. Apesar da presença de condomínios de alto padrão e ampla infraestrutura urbana, a insuficiência do saneamento permanece como um dos principais fatores de pressão sobre os ecossistemas lagunares locais (KOIFMAN et al., 2026; CUNHA et al., 2025a).

5 O COMPLEXO LAGUNAR DE JACAREPAGUÁ E OS IMPACTOS AMBIENTAIS

O Complexo Lagunar de Jacarepaguá constitui um dos mais importantes sistemas lacustres urbanos do estado do Rio de Janeiro. Formado pelas lagoas da Tijuca, Jacarepaguá, Camorim e Marapendi, o

complexo recebe contribuições de diversos rios e canais inseridos em uma extensa bacia de drenagem submetida a intensa pressão antrópica (SONDOTÉCNICA, 1998; AGEVAP, 2021).

A rápida urbanização observada nas últimas décadas promoveu alterações significativas na dinâmica hidrológica e ecológica da região. O lançamento contínuo de esgotos domésticos, tratados parcialmente ou in natura, intensificou processos de eutrofização, assoreamento, redução do espelho d'água e degradação da qualidade ambiental das lagoas (CASTRO et al., 2023; SOUZA & AZEVEDO, 2020; PEREIRA; BOTTREL; BILA, 2021).

A elevada carga de nutrientes lançada no sistema favorece o crescimento excessivo de macrófitas aquáticas e algas, comprometendo a circulação hídrica e reduzindo os níveis de oxigênio dissolvido. Esse processo repercute diretamente sobre a biodiversidade local, ocasionando mortandade de organismos aquáticos e deterioração das condições ecológicas do sistema lagunar (CUNHA et al., 2025b).

Outro aspecto relevante refere-se à baixa capacidade de renovação hídrica de determinados trechos do complexo, característica que potencializa a permanência dos poluentes e reduz a eficiência dos processos naturais de autodepuração. Nesse contexto, mesmo efluentes submetidos a tratamentos secundários podem contribuir significativamente para a manutenção da degradação ambiental quando lançados continuamente em ambientes frágeis (CASTRO et al., 2023; CUNHA et al., 2025a).

Os Índices de Qualidade da Água (IQA) monitorados na região nos anos de 2019 até 2021, demonstram uma média de 33% em condições predominantemente "ruins" e média de 58,0% em condições "muito ruins", para diversos pontos tributários das lagoas (INEA, 2023). Esses resultados refletem não apenas a deficiência histórica do saneamento, mas também a ausência de planejamento urbano integrado e de políticas efetivas de recuperação ambiental.

6 CONTAMINANTES EMERGENTES E DESCARTE DE MEDICAMENTOS

Além dos impactos tradicionalmente associados à matéria orgânica e aos nutrientes, o ambiente aquático urbano passou a receber crescente atenção em relação à presença de contaminantes emergentes, especialmente compostos farmacêuticos (CASTRO et al., 2023; CUNHA et al., 2025a; SOUZA et al., 2020). Medicamentos, hormônios, antibióticos, analgésicos e produtos de higiene pessoal têm sido identificados em rios, lagoas e efluentes tratados em diferentes regiões do mundo.

Grande parte desses compostos alcança os corpos hídricos por meio da excreção humana e animal, além do descarte inadequado de medicamentos vencidos ou não utilizados. Como muitos sistemas convencionais de tratamento de esgoto não foram concebidos para remover micropoluentes emergentes, parte significativa dessas substâncias permanece nos efluentes tratados e atinge o ambiente aquático (RABELLO et al., 2019; SOUZA et al., 2020; SOUZA et al., 2021).

Os efeitos ambientais associados aos compostos farmacêuticos incluem alterações endócrinas, toxicidade crônica, bioacumulação e impactos sobre organismos aquáticos (SALOMÃO et al., 2020; SOUZA et al., 2020; SALOMÃO E MARQUES, 2014). A presença contínua dessas substâncias em baixas concentrações representa desafio relevante para a engenharia sanitária e para a gestão ambiental contemporânea.

No Brasil, a legislação ambiental ainda apresenta limitações quanto ao estabelecimento de padrões específicos para diversos contaminantes emergentes (SOUZA et al., 2020). Essa lacuna regulatória reforça a importância do monitoramento ambiental, da ampliação das pesquisas científicas e da promoção de ações educativas voltadas ao consumo consciente e ao descarte adequado de medicamentos (CASTRO et al., 2023).

A discussão sobre fármacos no meio ambiente amplia o entendimento do saneamento para além dos parâmetros convencionais de poluição, evidenciando a necessidade de abordagens integradas capazes de relacionar saúde pública, comportamento social, infraestrutura sanitária e preservação dos recursos hídricos (CASTRO et al., 2023; CUNHA et al., 2025a).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do panorama discutido, verifica-se que os desafios relacionados ao saneamento ambiental ultrapassam questões estritamente técnicas, envolvendo processos históricos de urbanização, desigualdade socioespacial, fragilidade institucional e pressão contínua sobre os ecossistemas urbanos.

No caso da Região Administrativa da Barra da Tijuca e do Complexo Lagunar de Jacarepaguá, observa-se a coexistência de intensa valorização imobiliária, expansão urbana acelerada e significativa precariedade sanitária. Nesse cenário, as estações descentralizadas de tratamento de esgoto assumem

papel estratégico para mitigação dos impactos ambientais, embora sua efetividade dependa diretamente de operação adequada, fiscalização e monitoramento permanentes.

A incorporação do debate sobre nutrientes, eutrofização e contaminantes emergentes amplia e aprofunda a problemática, cuja compreensão contemporânea do saneamento, evidencia que a qualidade ambiental dos corpos hídricos urbanos está profundamente associada às escolhas de planejamento urbano, à governança ambiental e aos padrões de consumo da sociedade.

Assim, a preservação dos sistemas lagunares urbanos exige ações integradas que articulem infraestrutura sanitária, gestão ambiental, educação da população, bem como o fortalecimento das políticas públicas voltadas à recuperação dos ecossistemas degradados, objetivando o bem-estar equilibrado tanto social quanto ambiental.

BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (AGEVAP). Atlas da Região Hidrográfica V: Baía de Guanabara e Sistemas Lagunares de Maricá e Jacarepaguá. Resende, RJ, 2021. Disponível em: <http://www.comitebaiadeguanabara.org.br/wpcontent/uploads/2021/03/Atlas_C BH-BG.pdf>. Acesso em 05 de mai. 2022.

BASSOI, Lineu José; GUAZELLI, Milo Ricardo. Controle Ambiental da Água. In: PHILIPPI JÚNIOR, Arlindo; ROMÉRO, Marcelo de Andrade; BRUNA, Gilda Collet. Curso de Gestão Ambiental. Barueri, SP: Manole, 2004. Cap. 02. p. 19-52.

BILA, Danielle Maia; DEZOTTI, Márcia. Fármacos no Meio Ambiente. Quim. Nova, v. 26, n. 4, 523-530, 2003.

CASTRO, Fernando Augusto Braga; SALOMÃO, André Luís de Sá; NETTO, Alena Torres. Sanitary conditions of the third largest informal settlement in Brazil. Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development, v. 13, n. 12, p. 962-973, 2023.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 5. Reatores Anaeróbios. 2ª. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (UFMG), 2007.

CUNHA, Priscila Maria de Oliveira Muniz; DE SOUSA, Juliana Souza Damico; DA CRUZ, Maria Carolina Souza; COUTINHO, Rodrigo; DOMINGOS, Patricia; KREPSKY, Natascha; HAUSER-DAVIS, Rachel Ann; MARQUES, Marcia; SAGGIORO, Enrico Mendes; SALOMÃO, André Luís de Sá. Environmental risk assessment methodology for urban tropical lagoons based on feasible lines of evidence under limited resources conditions: Jacarepaguá Lagoon/Brazil. Ecotoxicology v. 34, 539–553 2025a.

CUNHA, Priscila Maria de Oliveira Muniz; ALVES, Julia Araújo; ARAÚJO, Adriana Pereira Oliveira; SAGGIORO, Enrico Mendes; SALOMÃO, André Luís de Sá. Análise integrada de indicadores de risco ecológico em um ecossistema lagunar urbano. Revista Internacional de Ciências, v. 15, n. 2, p. 160-175, 2025b.

HONORATO, Leandro Marcos Charré; D' EÇA, Nayara Ferreira da Gama; SANTOS, Ana Silvia Pereira Santos; SALOMÃO, André Luís de Sá. Tratamento descentralizado de esgoto doméstico: revisão sistemática. Revista DAE, v. 69, n. 233, p. 173-191, 2021.

INEA, 2020, Sistema Laguna de Jacarepaguá, Rio de Janeiro. Disponível em:<http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/Monitoramento/Qualidadedaagua/Lagoas/SistemaLagunardeJacarepagua/PrincipalSLJ/index.htm> Acesso em 8 de out. 2020.

JACOB, Rayssa Vogeler Berquó; SOUZA, Maria Clara Vieira Pereira; LISBÔA, Vitor Santos; ANDRADE , Vitor Moraes; SANTOS, Ana Silvia Pereira; SALOMÃO, André Luís de Sá. Characterization and Proposal of Technologies for the Treatment of Domestic Sewage in Ilha Grande Bay–RJ. Revista de Gestão Social e Ambiental, v. 18, n. 3, p. e05240, 2024.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. Tratamento de Esgotos Domésticos. 4 ed. Rio de Janeiro RJ: Associação Brasileira de Engenharia Ambiental e Sanitária, ABES, 2005.

KOIFMAN, Gustavo; CESAR, Ricardo; SANTOS, Domynique; RIBEIRO, Yan; FILGUEIRA, Lara; LAVINAS, Pedro; SOARES, Danielle; LOURENÇO, Rodrigo; SALOMÃO, André; MARQUES, Marcia; ALEXANDRE, Katia; CARNEIRO,

Manuel; CASTILHOS, Zuleica; LINO, Adan; PARENTE, Claudio; MACHADO, Wilson; SILVEIRA, Carla. Ecological risk assessment of dredged sediments from a tropical urban lagoon: is Brazilian law sufficient for protecting aquatic and soil biota? Anthropocene, p. 100548, 2026.

LA ROVERE, Emilio L.; D'AVIGOGNON, Alexandre; PIERRE, Carla Valdetaro; KLIGERMAN, Débora Cynamon; SILVA, Heliana V. de Oliveira; BARATA, Martha M.de Lima; MALHEIROS, Telma Maria Marques. Manual de Auditoria Ambiental de Estações de Tratamento de Esgotos. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

MENDES, ANTÔNIO DA CRUZ GOUVEIA; MEDEIROS, Kátia Rejane; FARIAS, Sidney Feitosa; LESSA, Fábio Delgado; CARVALHO, Carolina Novaes; DUARTE, Petra Oliveira. Sistema de Informações Hospitalares Fonte Complementar na Vigilância e Monitoramento das Doenças de Veiculação Hídrica. Informe Epidemiológico do SUS, v. 9, n. 2, p. 111-124, 2000.

METCALF, L; EDDY, H. P. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5ª. ed. McGraw Hill, Brasil, 2016.

Organização Mundial da Saúde (OMS). Guidelines On Sanitation And Health. Switzerland: WHO, 2018. Disponível em: < http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/274939/9789241514705eng.pdf?u a=1> Acesso em 10 de ago. 2020.

PEREIRA, Renata de Oliviera; BOTTREL, Sue Ellen Costa; BILA, Daniela Maia. Poluição e Qualidade da Água. In: SANTOS, Ana Silvia Pereira; OHNUMA Jr., Alfredo Akira. Engenharia e Meio Ambiente - Aspectos Conceituais e Práticos. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2021. Cap. 05. p. 83-97. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA). Cadernos MCidades - Saneamento ambiental. V.5, Brasília, DF: 2004. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra;jsessionid=79F1244D2007E27730C12615B5776274.proposicoesWebExterno1?codteor=136295&filename=TramitacaoPL+1144/2003#:~:text=2%C2%BA%20A%20Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de,Distrito%20Federal%20e%20os%20Munic%C3%AD pios>. Acesso em 08 de nov. 2021.

PHILIPPI JÚNIOR, Arlindo; SILVEIRA, Vicente Fernando. Saneamento Ambiental e Ecologia Aplicada. In: PHILIPPI JÚNIOR, Arlindo; ROMÉRO, Marcelo de Andrade; BRUNA, Gilda Collet. Curso de Gestão Ambiental. Barueri, SP: Manole, 2004. Cap. 02. p. 19-52.

RABELLO, Vinicius Malta; TEIXEIRA, Lia Cardoso Rocha Saraiva; GONÇALVES, Ana Paula Vasconcelos, SALOMÃO, André Luís de Sá. The efficiency of constructed wetlands and algae tanks for the removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs): a systematic review. Water, Air, & Soil Pollution, v. 230, n. 10, p. 236, 2019.

SALOMÃO, Andre Luís de Sá; HAUSER-DAVIS, Rachel Ann; MARQUES, Marcia. Critical knowledge gaps and relevant variables requiring consideration when performing aquatic ecotoxicity assays. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 203, p. 110941, 2020.

SALOMÃO, André Luís de Sá; MARQUES, Marcia. Quantification of alkali-labile phosphate groups in the plasma of Oreochromis niloticus exposed to intermittent discharges of oestrogens: effect of concentration vs. load. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, v. 94, n. 11, p. 1161-1172, 2014.

SILVA JUNIOR, Luís Carlos Soares da; SALOMÃO, André Luís de Sá; SANTOS, Ana Silvia Pereira. MATTI–a multi-criteria decision analysis framework for assessing wastewater treatment technologies. Water Science & Technology, v. 86, n. 10, p. 2764-2776, 2022.

SILVA, Gabriela. O Processo de Ocupação Urbana da Barra da Tijuca (RJ): Problemas Ambientais, Conflitos Sócio-ambientais, Impactos Ambientais Urbanos. Pesquisa em Arquitetura e Construção (PARC), Campinas, SP, v. 1, n.1, 65–93, 2006. Disponível em: https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8634529. Acessado em: 11 nov. 2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS. Diagnóstico dos serviços de água e esgotos. Site institucional, 2018.

SONDOTÉCNICA Engenharia de Solos S.A, 1998. Estudo de Impacto Ambiental para o Projeto de Recuperação Ambiental da Macrobacia de Jacarepaguá. Diagnóstico do meio biótico. Rio de Janeiro, v.3., 108, 1998.

SOUZA, C.C.; AQUINO, S.F.; SILVA, S.Q. Ensaios toxicológicos aplicados à análise de águas contaminadas por fármacos. Eng Sanit Ambient. v. 25, n. 2, p. 217-228, 2020.

SOUZA, F.P; AZEVEDO, J.P.S. Panorama das lagoas urbanas no Rio de Janeiro: aspectos relevantes na gestão das Lagoas Rodrigo de Freitas, Araruama e Complexo Lagunar de Jacarepaguá. Eng Sanit Ambient. v. 25, n.1, p. 197-204, 2020.

SOUZA, Helena de Oliveira; COSTA, Rafaela dos Santos; QUADRA, Gabrielle Rabelo; FERNANDEZ, Marcos Antonio dos Santos. Pharmaceutical pollution and sustainable development goals: Going the right way? Sustainable Chemistry and Pharmacy. V. 21, 100428, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100428.

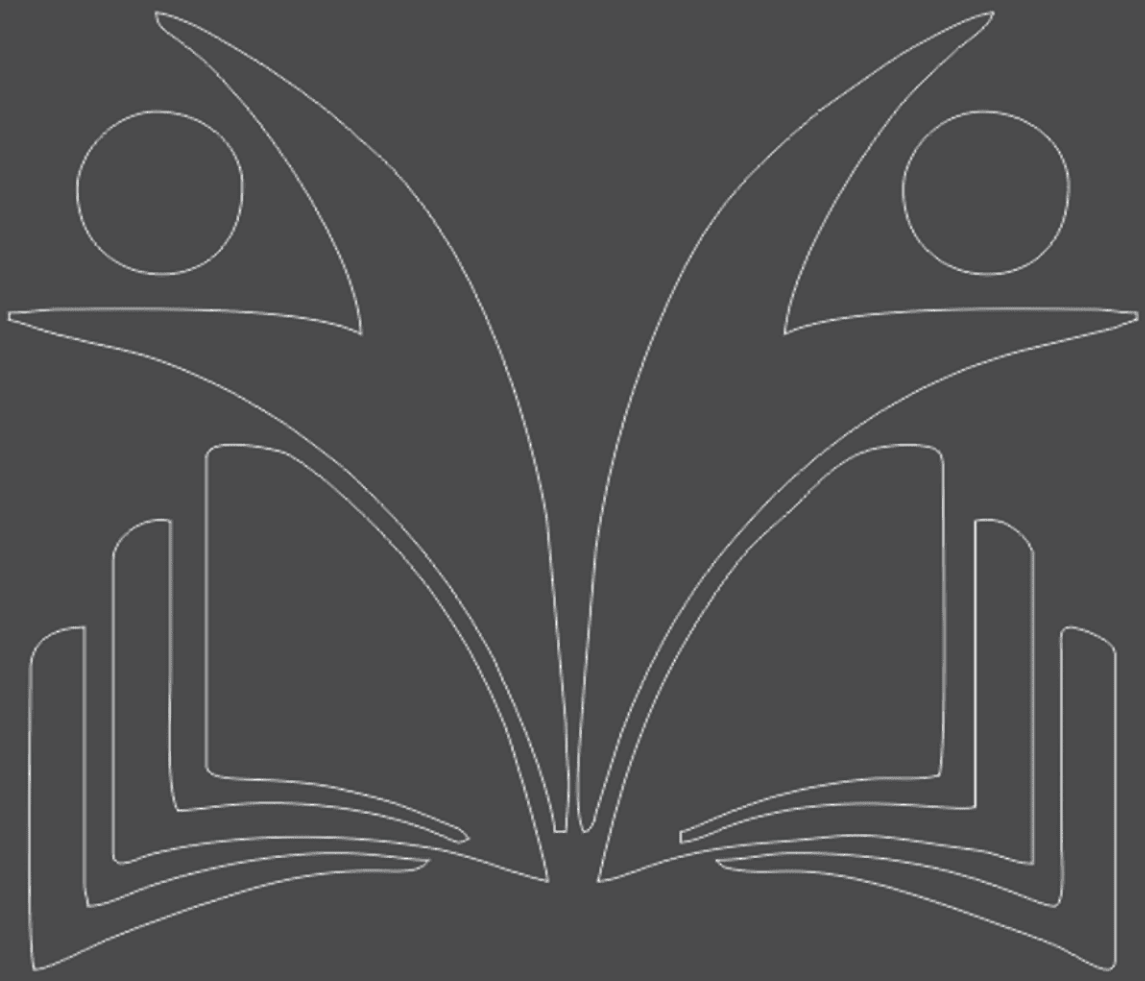
VON SPERLING, Marcos. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 2ª. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (UFMG), 1996.

Capítulo 2

10.37423/260911336

ORIGEM E FUNDAMENTOS DE IOT (INTERNET OF THINGS)

Roger Oliva Felix *Centro Paula Souza*



CONTEXTUALIZAÇÃO

Nas últimas duas décadas, a exposição da informação mudou radicalmente, impulsionando uma mudança acentuada no cotidiano das pessoas, uma vez que as redes de comunicação de dados na internet protagonizam atualmente um cenário antes dominado pela radiodifusão e meios impressos. Serviços governamentais sociais, bem como o acesso a vários tipos de dados, trazem à sociedade um novo panorama de acesso e consumo de informação. Segundo a pesquisa de Tecnologias da informação e comunicação (TIC) Domicílios do Comitê Gestor da Internet no Brasil (CGI), o número de usuários de internet no Brasil em 2019 chegou a 134 milhões, representando 74% da população acima de 10 anos de idade, com 71% dos lares tendo acesso à rede.

O avanço natural das tecnologias de telecomunicações traz à tona outras possibilidades de uso dessas redes de comunicação em escala mundial. A internet avança sob aspectos evolutivos, a partir de uma rede de comunicação inicialmente com pretensões limitadas, para um cenário global, passando a ser o principal meio de difusão e modo de compartilhar dados.

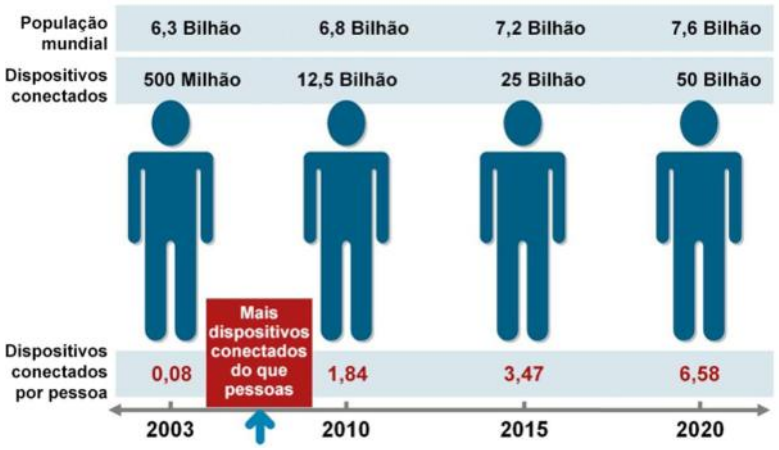
As pessoas têm o próprio cotidiano diretamente impactado pelos avanços das tecnologias móveis em paralelo às inovações da internet, havendo uma mudança revolucionária na maneira de viver e interagir. Por meio do uso dos smartphones, ficaram evidentes as facilidades de comunicação e de apoio à realização de tarefas do cotidiano. Pode-se afirmar que seria muito difícil as pessoas se imaginarem sem eles, pois são tantos os recursos em torno desses dispositivos, que praticamente tornaram-se uma extensão do nosso ser. O acesso contínuo e instantâneo à internet deixa de ser entretenimento e passa para o âmbito da necessidade, pois praticamente todas as plataformas de serviços de comunicação e de gestão de informações estão interligadas através da infraestrutura de redes de comunicação mundial. (FERRASI et al., 2016).

A Cisco Internet Business Solutions Group afirma que

> O crescimento impulsivo de smartphones e tablets levou o número de dispositivos conectados à Internet até 12,5 bilhões em 2010, dessa forma o número de dispositivos conectados por pessoa foi superior a 1 (exatamente 1,84) pela primeira vez na história. (EVANS, 2011, p. 3).

Na Figura 1, pode-se acompanhar a progressão da quantidade de dispositivos móveis conectados, por pessoa, em relação à população mundial.

Figura 1 - População Mundial x Dispositivos Conectados



Fonte: Cisco, 2011.

A tecnologia está cada vez mais presente no dia a dia dos seres humanos com a finalidade de facilitar e simplificar suas atividades. As várias tecnologias podem ser encontradas tanto no meio residencial, quanto no industrial, permitindo monitorar ou controlar “coisas”, por exemplo; monitorar localização de pessoas, fazer monitoramento de câmeras a distância, controlar temperaturas em ambientes e outras aplicações que se referem à Internet of Things (IoT), termo que vem do inglês e significa Internet das Coisas.

Dificilmente um profissional de tecnologia, independentemente da área em que atua, desconhece o termo IoT, pois essa tecnologia está presente praticamente em todos os meios. Ao se observar uma aplicação voltada à área de agricultura, percebe-se que essa tecnologia nos auxilia muito, até ajuda na economia de tempo e no aumento da produtividade. Temos, por exemplo a monitoração de máquinas agrícolas controladas por Global Positioning System (GPS), o monitoramento visual de fazendas realizado por drones, a monitoração e o controle da alimentação dos animais, entre outros. Estas são apenas algumas aplicações diferenciadas de IoT que temos hoje, valendo ressaltar que o futuro de IoT é muito promissor.

Esse curso traz conceitos importantes para darmos início ao estudo de IoT, objetivando conhecer os dispositivos adequados e disponíveis no mercado, as linguagens de programação nela utilizadas, as tecnologias mais adequadas a cada aplicação e aplicações usuais de IoT em diversas áreas.

DEFINIÇÃO

No instante em que uma tecnologia é exposta ao uso, tudo ao seu entorno praticamente avança também. Foi assim com a internet por meio da abertura do código-fonte dos servidores UNIX. Esse fator ocorre também com a tecnologia móvel, tendo início com os computadores de bolso, que vem do inglês Personal Digital Assistant (PDAs), logo em seguida vieram os smartphones e outras possibilidades de dispositivos por exemplo, os wearables (dispositivos vestíveis), com sensores em relógios, pulseiras e até nas roupas. A Internet das Coisas traz muitas possibilidades e impulsiona as tecnologias móveis. Assim, as perspectivas de evolução são promissoras, porque a internet tornou-se parte fundamental da sociedade e trazê-la à vida cotidiana de maneira instantânea e intensa poderá realmente ser revolucionário. (FERRASI et al., 2016).

Para Atzori et al. (2010), atualmente, a Internet das Coisas (IoT) recebe grande destaque no cenário das telecomunicações e está sendo considerada a revolução tecnológica que representa o futuro da computação e da comunicação.

A internet dos dias atuais atravessa uma de suas maiores revoluções tecnológicas, em que a quantidade de dispositivos e objetos do nosso cotidiano conectado à rede supera e muito a quantidade de pessoas. A tendência é que tenhamos cada vez mais objetos e dispositivos inteligentes interconectados, trocando dados a todo instante por meio da interconexão. Este conceito é conhecido como a Internet das Coisas, do inglês Internet of Things (IoT). Tal denominação foi desenvolvida por Kevin Ashton, do Massachusetts Institute of Technology (MIT), em uma de suas conferências, em 2009, e acabou sendo adotada mundialmente para conceber essas mudanças. Dentre tantos outros termos, a Internet das Coisas pode ser definida da seguinte forma:

> É um conjunto de sensores, redes, atuadores e objetos ligados por sistemas informatizados que expandem a comunicação entre pessoas e objetos, de forma autônoma e automática. (LEMOS, 2013, p.239).

Em outra definição, descrita por Kevin Ashton em uma entrevista concedida à Revista Inovação em Pauta da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), registra-se:

> Um ponto de encontro entre as redes de comunicações humanas (Internet) e o mundo real das coisas, em que não mais apenas "utilizaremos um computador", mas onde o “use-se computador” independentemente, de modo a tornar a vida mais eficiente. Os objetos – as "coisas" – estarão interligados entre si e em rede, de modo inteligente, e passarão a "sentir" o mundo ao redor e a interagir com ele (ASHTON, 2014).

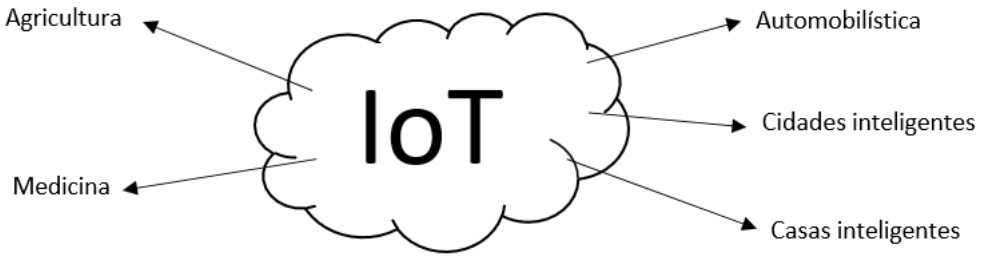
Essa nova fase de evolução tem a sua essência apoiada na Computação Ubíqua, termo criado por Mark Weiser, um cientista da computação que atuava como Chief Technology Officer (CTO, na Xerox's Palo Alto Research Center (PARC) e descritos no artigo The Computer for 21st Century, publicado em 1991. O texto defendia uma visão de futuro em que os computadores seriam invisíveis e incorporados aos objetos do cotidiano, substituindo os PCs habituais. (WEISER, 1991).

A proposta da Internet das Coisas consiste na ideia de que "coisas" coletem, armazenem e compartilhem uma grande quantidade de dados que, uma vez processados e analisados, possam gerar uma gigantesca quantidade de informações, bem como serviços de forma autônoma utilizando a internet.

O termo Internet da Coisas, que vem do inglês Internet of Things (IoT), foi formulado em 1999, por Kevin Ashton. A partir disso, esta rede de conectividade vem aparecendo em nosso dia a dia e em várias aplicações no mundo, como na medicina, agricultura, energia, cidades inteligentes, casas inteligentes e muito mais. A IoT pode ser considerada como um novo modelo da tecnologia, concebido por uma rede de máquinas e dispositivos capazes de interagir uns com os outros, sendo reconhecida como uma das áreas mais importantes da tecnologia futura.

A palavra "coisas" em IoT representa os objetos que utilizamos em nossa vida cotidiana e que permitem a possibilidade de podermos monitorá-los e controlá-los, interagindo, dessa maneira, com os dispositivos interconectados com acesso à internet. A Figura 2 mostra algumas áreas que já têm a presença de IoT.

Figura 2 – Aplicações de IoT



Fonte: Autoria própria, 2021.

Os dispositivos podem ser classificados como sensores e atuadores, os sensores têm a finalidade de captar os sinais das variáveis (temperatura, humidade, intensidade de luz, entre outros) e comunicar-se com outras “coisas” ou até com atuadores para que estes sejam acionados.

A distância entre o ser humano e as “coisas” pode ser ilimitada, havendo a possibilidade de controlar as variáveis a quilômetros de distância, garantindo um ótimo benefício para aplicação de IoT. Esse benefício ocorre principalmente devido às “coisas” estarem conectadas entre os dispositivos e a internet, podendo, dessa forma, haver monitoramento e controle de qualquer variável, independentemente de sua localização.

Mas o que representa “coisas” na prática?

As “coisas” podem ser representadas por liquidificadores, sistemas de iluminação, semáforos, câmeras de monitoramento, automóveis, aspiradores, máquina de lavar, tratores e muito mais.

Evolução e fundamentos

A Internet é reconhecida como uma rede mundial de computadores. Seu embrião surge no final da década de 1960, por meio da Advanced Research Projects Agency Network (ARPANET), uma organização experimental vinculada ao Departamento de Defesa Norte Americano que objetivava a superioridade tecnológica frente à antiga União Soviética.

Pode-se afirmar que, de fato, do ponto de vista técnico, é exatamente isto que ocorre: A Internet não passa de um aglomerado de equipamentos interconectados fisicamente, com a função primária de transportar informações de um ponto ao outro. Já a Wide World Web,ou simplesmente Web, é um padrão de serviços de página escrito por Tim Bernes-Lee, em 1989, podendo ser definida como um conjunto de aplicações que atuam em uma camada sobre a internet. (FERRASI et al., 2016).

Esse conjunto de aplicações passou por várias fases de evolução diferentes, tais como:

1ª Fase - Redes de Computadores: desde o seu surgimento, para a realização de pesquisas nas universidades e centros especializados, a internet tinha como principal finalidade interconectar computadores. Após a especificação da World Wide Web, surgem os serviços comerciais e a popularização da Internet.

2ª Fase – Redes de Pessoas e Comunidades: com o surgimento e a popularização dos Personal Computeres (PC), a Web passou a atender as necessidades voltadas a aplicações para interação entre as pessoas, como sites, buscadores de conteúdo, e-mails, ensino a distância, portais de notícias, comércio eletrônico, músicas e vídeos on-line, computadores de mão, smartphones e as redes sociais.

3ª Fase – Redes de Objetos e Dispositivos Inteligentes: esta é a fase atual em transição. Temos uma rede interligando vários objetos e sensores inteligentes, que, ao "sentirem" o ambiente ao seu redor, coletam dados e os compartilham entre si e com as pessoas, de modo que facilitem o dia a dia de alguma forma, modificando nossa maneira de viver.

Partindo do pressuposto da atual fase de evolução da internet, surge uma nova perspectiva para a utilização da infraestrutura de telecomunicações de dados estabelecidos e já utilizados. Os avanços ocorridos neste cenário buscam a extração e a geração de dados de forma autônoma, através de "coisas" inteligentes, sem a necessidade da interação humana, podendo ocorrer também o compartilhamento desses dados por meio da internet. A partir disso, as possibilidades de aplicações são muito vastas e remetem a diversas questões.

A evolução de IoT está crescendo cada vez mais, principalmente nas áreas citadas na Figura 1. Na medicina, por exemplo, existe atualmente a chamada "telemedicina", que proporciona uma grande praticidade e agilidade no atendimento dos pacientes. Nas casas inteligentes, smart home, vem aumentando exponencialmente a utilização de IoT, sendo uma a área em que há mais aplicações. Podemos observar também a utilidade de IoT na agricultura, smart farm, tendo como resultado a melhoria do agronegócio, ressaltando-se que muitos proprietários de área rural vêm investindo em tecnologias IoT, uma vez que tem havido vários benefícios, como eficiência na produção, qualidade de serviço, aumento de produtividade, entre outros.

As casas inteligentes não se resumem apenas a monitoramento e controle de luzes do interior de uma residência, mas pode haver outras "coisas" inteligentes, como o controle de temperatura do ar-condicionado por meio do smartphone, refrigeradores inteligentes que monitoram o uso dos mantimentos e até fazem pedido automático por delivery. Esses exemplos são eletrodomésticos que já existem no mercado, mas é quase impossível adquirir, pois têm um alto custo. (DEVI, 2015) (AVINASH et al., 2020).

Na agricultura, existem muitos trabalhos voltados à IoT, alguns deles correspondem ao monitoramento baseado em IoT para analisar o ambiente de cultivo e melhorar a eficiência da tomada de decisão por meio da análise de estatísticas de colheita, supervisão por drones e outras tecnologias. (LEE et al., 2013) (KULBACKI et al., 2018) (SANJEEVI, 2020).

Em tudo que pensarmos, é possível transformar em IoT, até mesmo aplicar sensores no corpo humano. Hoje já existem sensores werable, que são acoplados na pele do paciente para monitorar algumas variáveis, como batimentos cardíacos, pressão sanguínea, glicose ou até alertar sobre o horário dos medicamentos. Esse sensor revolucionou a área da saúde, trazendo muitos benefícios que auxiliam no acompanhamento médico (PANTELOPOULOS et al., 2009) (PASTORINO et al., 2013) (RODGERS et al., 2014).

VOCÊ SABIA?

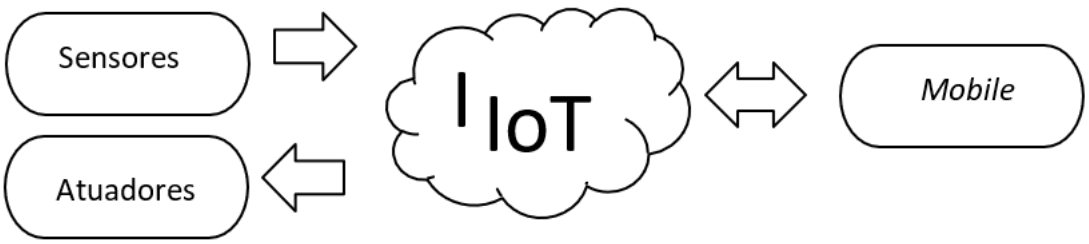
Os *werables* são "dispositivos vestíveis" acoplados no corpo humano para captar variáveis (batimento cardíaco, pressão sanguínea etc.) e são utilizados em pulseiras, relógios, óculos, entre outros.

Para ocorrer o funcionamento de IoT, é necessária a utilização de sensores presentes na arquitetura, como mostra a Figura 3. Desse modo, existem praticamente dois tipos de sensores: os sensores ativos que operam com sua própria energia, utilizando estímulos internos para coletar os dados, por exemplo, radares, escâner a laser e outros; e sensores passivos que respondem a estímulos externos, por exemplo, resistor depende de luz, sensor de presença e outros. Os sensores mais utilizados em IoT são: posição, movimento, velocidade, força, pressão, humidade, luz, temperatura e outros. (THOMAZINI et al., 2020).

No mercado nacional e internacional, é possível encontrar vários tipos de sensores que se adequam à necessidade da aplicação.

Os atuadores são responsáveis por executar alguma ação, como acionar luzes, motores, relés, servomotores, motor de passo, displays e outros. Para um sistema automatizado e com aplicação de IoT, o monitoramento realizado pelos sensores é fundamental, pois sem monitorar é impossível controlar o acionamento dos atuadores, portanto, os atuadores são dependentes dos sensores.

Figura 3 – Arquitetura simplificada de IoT



Fonte: Autoria própria, 2021.

As tecnologias mais acessíveis e utilizadas em IoT são: Wi-fi, Zigbee, Bluetooth, RFID e outras.

Wi-fi

O wi-fi tem uma vantagem de compatibilidade com as redes de Internet Protocol (IP). Um fato muito importante para IoT, por exemplo, é que ele pode monitorar e controlar dispositivos com tecnologia wi-fi embutida por meio de um mobile. No meio industrial, já existem válvulas eletropneumáticas ou hidráulicas com tecnologia wi-fi, que pode, dessa forma, ser controlada ou monitorada por meio da aplicação de IoT. Os dispositivos wi-fi voltados para aplicação de smart city são importantes quando a "coisa" que queremos monitorar ou controlar fica em difícil acesso para implementação de cabeamento de dados. A Figura 4 mostra o shield wi-fi.

Figura 4 – Shield wi-fi



Fonte: Autoria própria, 2021.

Zigbee

O Zigbee é uma rede sem fio que trabalha com uma baixa frequência, mas é restrita aos dispositivos que contêm essa tecnologia. Do mesmo modo que é possível monitorar e controlar variáveis pelo wi-fi, para o Zigbee também pode haver uma conexão entres os dispositivos. Dependendo das condições

ambientais e da potência do dispositivo, as distâncias de alcance podem passar de 100 metros. Estes dispositivos são ideais para aplicações em que não temos energia elétrica disponível, pois há um consumo de energia 10 vezes menor que nos dispositivos wi-fi. Dessa forma, os protótipos e os dispositivos são alimentados por baterias. A Figura 5 mostra o Shield Zigbee.

Figura 5 – Shield Zigbee



Fonte: Autoria própria, 2021.

Bluetooth

O bluetooth é muito conhecido por estar presente em aparelhos de celular a fim de realizar transferência de arquivos. Essa tecnologia tem uma vantagem: apresentar um menor consumo de energia e um alcance com uma distância de até 240 metros para versão 5.0. O consumo de energia elétrica destes dispositivos varia conforme a distância de comunicação que, quanto maior for, mais elevado será o consumo de energia elétrica. Os dispositivos bluetooth são mais utilizados para aplicações que exigem uma pequena distância, por exemplo, as casas inteligentes, que têm seus dispositivos localizados em um perímetro pequeno. A Figura 6 mostra o shield bluetooth.

Figura 6 – Shield Bluetooth



Fonte: Autoria própria, 2021.

RFID

A tecnologia Radio-Frequency IDentification (RFID) está presente em nosso cotidiano, principalmente em lojas e supermercados, tendo um curto alcance em etiquetas que podem ser lidas por sensores. Para cada aplicação, as frequências do sistema RFID devem ser ajustadas, obtendo-se assim o melhor desempenho. Atualmente, essa tecnologia é encontrada também em portarias remotas nos condomínios, as quais são monitoras e controladas por uma central localizada distante do condomínio, e cada condômino tem suas etiquetas de acesso, que são utilizadas para acessar portões de entrada e saída, caixas de correio, salão de festa, liberação de bicicletário, entre outros acessos. A Figura 7 mostra o shield RFID.

Figura 7 – Shield RFID



Fonte: Autoria própria, 2021.

VOCÊ SABIA?

Os *shields* são placas intercambiáveis com os protótipos de sistemas embarcados, tendo a possibilidade de ser conectada de maneira prática, possuindo características semelhantes (tamanho e forma) ao protótipo do sistema embarcado que foi utilizado.

DESAFIOS

Um ponto desafiador relacionado a IoT corresponde aos protocolos de segurança. Muitas indústrias não utilizam a tecnologia IoT, pois não têm segurança nas transmissões de dados, podendo enviar dados não encriptados (abertos). As consequências podem ser graves caso haja uma invasão de hackers, que conseguem facilmente acessar as informações, monitorar as variáveis e até mesmo ter controle sobre elas. Por isso, muitas empresas que têm monitoramento e controle dos sistemas

produtivos preferem utilizar outros dispositivos, pois estes oferecem maior segurança dos dados. Para as indústrias que fabricam dispositivos eletrônicos, a inserção de IoT no mercado é muito importante, porém é preciso verificar as possíveis falhas na transmissão de dados e projetar dispositivos que tenham protocolos universais, garantindo, dessa forma, a segurança da informação.

VOCÊ SABIA?

A casa, os equipamentos, a fazenda, a cidade estão cada vez mais inteligentes, porém não estão seguros. Os *hackers* conseguem descobrir diversas vulnerabilidades em dispositivos IoT, e uma delas diz respeito aos dados transmitidos não encriptados, facilitando a visualização deles. Por exemplo, para uma empresa que monitora seu custo de fabricação em tempo real, não é recomendável utilizar um sistema IoT, pois existem *hackers* que podem acessar as informações e revendê-las para outros interessados. Por isso, o desenvolvimento de dispositivos com protocolo de segurança universal é importante para alavancar a implementação de IoT na indústria.

Um desafio que está sendo superado aos poucos corresponde a um fato polêmico: Muitos pensam que IoT vai substituir o ser humano, mas, em vez disso, essa tecnologia vai trazer novos cargos com finalidades diferentes, como monitorar e controlar as variáveis, além da necessidade de novos estudiosos na área de pesquisa e de desenvolvimento de IoT. Com o avanço da IoT, alguns novos trabalhos estão demonstrando estatisticamente os benefícios da inserção de IoT. (PAVLOU, 2018). Por exemplo, uma aplicação de IoT significativa é constada em hotéis, os quais têm a necessidade de realizar diversas tarefas para suprimir os pedidos dos hóspedes, melhorando a qualidade de serviço e agilidade nos atendimentos. (MAGLOVSKA et al., 2020) (SHARMA et al., 2021).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHTON, Kevin et al. That “internet of things” thing. RFID journal, v. 22, n. 7, p. 97-114, 2009.

ASHTON, Kevin. Internet das Coisas, Nova Revolução da Conectividade. Rio de Janeiro: 2014, ed. 18, Revista Inovação em Pauta. Entrevista concedida a Rogério Rangel.

ATZORI, Luigi; IERA, Antônio; MORABITO, Giacomo. The internet of things: a survey. Computer networks, v. 54, n. 15, p. 2787-2805, 2010.

AVINASH, N. J. et al. Smart Fridge for Global Users Based on IOT Using Deep Learning. In:2020 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS). IEEE, 2020. p. 1-4.

CISCO. Disponível em: https://www.cisco.com/. Acesso em: Dezembro de 2013.

DEVI, G. Usha et al. Mutual authentication scheme for IoT application. Indian J Sci Technol, v. 8, n. 26, p. 15, 2015.

EVANS, Dave. A internet das coisas. San José: Cisco IBSG, 2011.

FERRASI, Faberson Augusto et al. Internet das coisas: uma possibilidade de aplicação das tecnologias móveis na educação. Redin-Revista Educacional Interdisciplinar, v. 5, n. 1, 2016.

KULBACKI, Marek et al. Survey of drones for agriculture automation from planting to harvest. In:2018 IEEE 22nd International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES). IEEE, 2018. p. 353-358.

LEE, Meonghun; HWANG, Jeonghwan; YOE, Hyun. Agricultural production system based on IoT. In:2013 IEEE 16Th international conference on computational science and engineering. IEEE, 2013. p. 833-837.

LEMOS, André. A comunicação das coisas: teoria ator-rede e cibercultura. São Paulo: Annablume, 2013.

MAGLOVSKA, Cvetanka Ristova; DIMITROV, Nikola V. The Internet of Things in a Hotel Context. In: Tourism International Scientific Conference Vrnjačka Banja-TISC. 2020. p. 416-433.

PANTELOPOULOS, Alexandros; BOURBAKIS, Nikolaos G. A survey on wearable sensor-based systems for health monitoring and prognosis. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), v. 40, n. 1, p. 1-12, 2009.

PASTORINO, M. et al. Wearable sensor network for health monitoring: the case of Parkinson disease. In: journal of physics: Conference Series. IOP Publishing, 2013.

PAVLOU, Paul A. Internet of Things–will humans be replaced or augmented. NIM Marketing Intelligence Review, v. 10, n. 2, p. 42-47, 2018.

RODGERS, Mary M.; PAI, Vinay M.; CONROY, Richard S. Recent advances in wearable sensors for health monitoring. IEEE Sensors Journal, v. 15, n. 6, p. 3119-3126, 2014.

SANJEEVI, P. et al. An ontology enabled internet of things framework in intelligent agriculture for preventing post-harvest losses. Complex & Intelligent Systems, p. 1-17, 2020.

SHARMA, Urvashi; GUPTA, Deepali. Analyzing the applications of internet of things in hotel industry. In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. p. 012041.

THOMAZINI, Daniel; DE ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga. Sensores industriais: fundamentos e aplicações. São Paulo: Saraiva Educação S.A., 2020.

WEISER, Mark. The computer for the 21st century. ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review, v. 3, n. 3, p. 3-11, 1999.

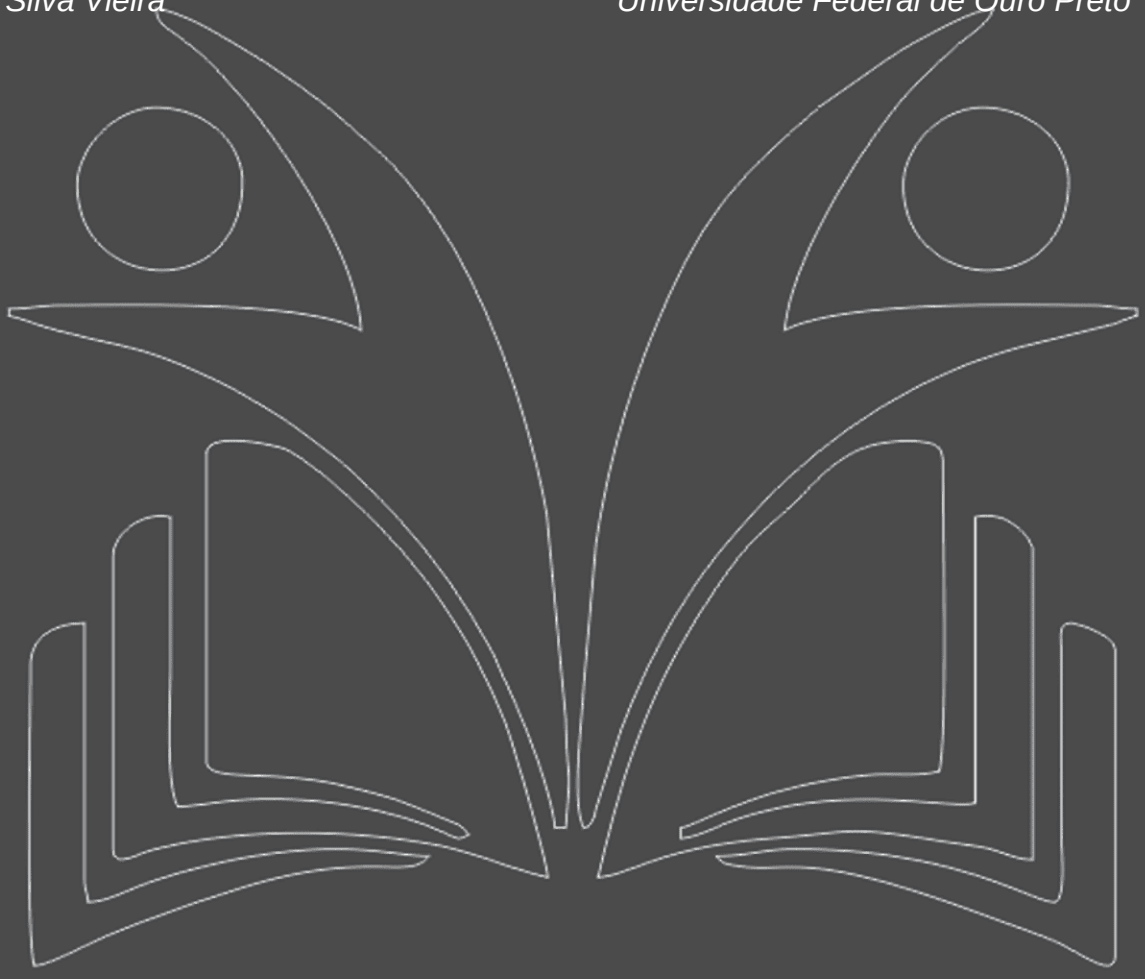
Capítulo 3

10.37423/260911338

O PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO EM PROJETO COM RESTRIÇÃO DE RECURSO APLICADO NA GESTÃO DE QUALIDADE NO ATENDIMENTO DE UM CALL CENTER

Lais Rivelli Matoso — *Universidade Federal de Ouro Preto*

Clarisse da Silva Vieira — *Universidade Federal de Ouro Preto*



RESUMO

Uma importante área de interesse no meio de gerenciamento de projetos é a otimização do sequenciamento das atividades e da alocação dos recursos. Várias formulações matemáticas já foram realizadas para tentar solucionar problemas desse tipo. Dessa forma, o presente artigo visa apresentar um modelo matemático para o Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR). O modelo proposto será implementado computacionalmente e utilizado no processo de otimização de um atendimento de Call Center. A solução ótima do problema e os resultados obtidos mostram-se condizentes com os objetivos iniciais, indicando a modelagem como uma ferramenta no processo de tomada de decisão para a gestão da qualidade.

Palavras-Chaves: Sequenciamento, Alocação de Recursos, Modelagem Matemática, Gestão da Qualidade, Call Center.

1 INTRODUÇÃO

Diante da intensa competitividade das empresas e a busca incessante por melhores resultados, as organizações investem cada vez mais para reduzir o tempo da sua produção. Com isso, se uma empresa deseja estar, de algum modo, entre as melhores do mercado, ela deve ter um planejamento otimizado.

O “Planejamento e Controle da Produção” e a “Gestão da Qualidade” são áreas responsáveis por coordenar e aplicar de forma eficiente os recursos produtivos, fazendo com que as decisões deixem de ser tomadas de forma intuitiva e passem a seguir critérios de melhoria racionais e computacionais.

Entende-se que a competitividade está ligada ao conhecimento e novas formas de aplicá- lo. Segundo (Carpinetti 2016), a gestão da qualidade pode ser compreendida como um agente estratégico no aperfeiçoamento da produtividade e competitividade de uma organização. Diante da intensa competitividade do mercado e da busca incessante por melhores resultados, as organizações investem cada vez mais em estratégias para reduzir o tempo de seus processos e identificar gargalos tecnológicos que possam comprometer a eficiência operacional. Assim, a aplicação de modelos matemáticos para coordenar tarefas sequenciais e simultâneas não apenas refina o controle da produção, mas assegura que pequenos ganhos em produtividade resultem em benefícios significativos para a qualidade final do serviço prestado

Para o cenário brasileiro, ganhos de produtividade podem significar a sobrevivência da empresa. Dessa forma, o gerenciamento de projetos é uma prática encontrada pelas empresas para criar vantagens com relação à eficiência da produtividade.

Dentro do gerenciamento de projetos, o Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) - Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recurso (PSPRR) consiste no sequenciamento das atividades de um projeto, juntamente com a alocação de recursos necessários para executá-las (Blazewicz et al. 1983).

Segundo Brucker et al. (1999), o PSPRP é um problema de otimização combinatória que cobre muitas situações de programação "clássicas". Seja V = {1, . . . , n} o conjunto de atividades que devem ser sequenciadas utilizando o conjunto de recursos R = {0, 1, . . . , k}. O recurso k ∈ R tem Rk unidades disponíveis durante todo o horizonte de tempo do projeto. Cada atividade i ∈ V tem um tempo de execução de pi, unidades de tempo, e utiliza uma quantidade específica qik do recurso k a cada instante do seu processamento. As atividades devem ser sequenciadas sem preempção, ou seja, uma vez

iniciada, a atividade deve ser completamente executada. As relações de precedências entre as atividades devem ser respeitadas e são representadas pelo conjunto E ={(i, j)}. Dessa forma, i deve começar sua execução antes da atividade j.

O objetivo geral desse artigo é propor um modelo matemático para o PSPRR e utilizá-lo em um caso real, com o intuito de analisar e identificar melhorias de eficiência no processo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A Gestão da Qualidade evoluiu ao longo das últimas décadas de uma abordagem restrita ao controle final do produto para um modelo estratégico, integrado aos processos organizacionais e à tomada de decisão. Para Garvin (1987), a qualidade pode ser compreendida sob múltiplas dimensões, incluindo desempenho, confiabilidade, conformidade e rapidez, sendo esta última especialmente crítica em organizações prestadoras de serviços, como os Call Centers.

Segundo Juran e Godfrey (1999), a qualidade está diretamente relacionada à capacidade de planejar processos de forma estruturada, prevenindo falhas antes que elas ocorram. Essa visão reforça a importância do planejamento e controle das atividades operacionais, uma vez que atrasos, gargalos e má alocação de recursos impactam diretamente indicadores como nível de serviço, tempo médio de atendimento e satisfação do cliente.

No contexto da qualidade em serviços, Parasuraman, Zeithaml e Berry (1988) destacam que a percepção do cliente é fortemente influenciada pelo tempo de resposta e pela consistência do atendimento. Em Call Centers, esses fatores dependem diretamente do sequenciamento adequado das atividades e da disponibilidade de recursos humanos. Assim, falhas no planejamento operacional tendem a comprometer a qualidade percebida, mesmo quando os atendentes possuem treinamento adequado.

De acordo com Carpinetti (2016), a gestão da qualidade deve ser entendida como um sistema integrado, no qual ferramentas quantitativas e modelos analíticos desempenham papel fundamental no suporte à decisão. O autor ressalta que a aplicação de métodos matemáticos contribui para a redução da variabilidade dos processos, aumento da previsibilidade operacional e melhoria contínua, princípios alinhados às abordagens do Total Quality Management (TQM).

A utilização de modelos matemáticos para representar o PSPRR, pode ser compreendida como uma ferramenta de apoio à gestão da qualidade, uma vez que possibilita estruturar processos de forma racional e otimizada. Conforme apontam Demeulemeester e Herroelen (2002), o PSPRR permite minimizar o tempo total de execução dos processos, respeitando limitações operacionais, o que contribui diretamente para a eficiência e confiabilidade do sistema produtivo.

Estudos como o de Johnston e Clark (2008) reforçam que a melhoria da qualidade em serviços depende da integração entre gestão de processos, tecnologia e métodos quantitativos. No caso específico de Call Centers, Gans, Koole e Mandelbaum (2003) destacam que o desempenho do atendimento está fortemente associado à gestão da capacidade e à alocação eficiente de operadores ao longo do tempo. Assim, a aplicação de modelos de otimização ao sequenciamento das atividades operacionais, torna-se um elemento estratégico para garantir níveis adequados de qualidade, produtividade e satisfação do cliente.

No âmbito das discussões contemporâneas sobre o PSPRR, destaca-se o trabalho de Ortiz-Pimiento e Díaz-Serna (2020), que propõe um modelo de otimização voltado para o desenvolvimento de novos produtos. Diferente das abordagens determinísticas convencionais, os autores introduzem um contexto probabilístico para lidar com os riscos inerentes a projetos inovadores, utilizando distribuições de probabilidade para representar durações e a inserção estocástica de tarefas.

De acordo com Ichihara (2002), a formulação clássica do PSPRP pode ser definida também para projetos com diferentes atividades, no formato atividade no-nó, um grafo acíclico, no qual, os nós representam as atividades e os arcos representam as restrições, com as seguintes definições: duas atividades fantasmas são introduzidas: a atividade 0 que representa a primeira do projeto e é a predecessora direta ou indireta de todas as outras do projeto, e a atividade n+1 que representa a atividade de conclusão e é a sucessora direta ou indireta de todas as atividades. As atividades estão associadas a um jogo de relacionamento de precedência End-Start com atraso zero. O que significa que nenhuma atividade pode ser iniciada antes que suas predecessoras tenham terminado. Não há data de início ou término definida para qualquer atividade do projeto. Cada atividade i tem uma duração fixa (os tempos de preparação são ignorados ou incluídos na duração fixa). Para cada atividade é preciso um número fixo de unidades de recurso renovável do tipo k. Requisitos de recursos (qik) são constantes conhecidas durante o processamento do trabalho. A disponibilidade de recurso renovável (Rk) também é uma constante conhecida ao longo do projeto. Nenhuma atividade pode ser

interrompida depois de iniciada. O objetivo é completar o projeto tão logo quanto possível, sem violar qualquer restrição de recurso e de precedência.

De acordo com Herroelen (2005), as relações de precedência entre as atividades definem quais são as atividades sucessoras que não podem iniciar sem que as atividades predecessoras tenham sido concluídas. Assim, o início da atividade sucessora depende do término da predecessora. Este é o tipo de precedência mais comum. No entanto, outros tipos de relações podem existir como variações do problema original.

Os valores dos tempos de precedência apenas restringem o início ou término das atividades. Mas, em certas situações, esse tempo pode ser relacionado com o tempo de espera, ou seja, um tempo mínimo entre as datas de início e/ ou término das atividades, segundo (Coelho, 2004).

O PSPRR, para Mingozzi et al. (1998), possui um único objetivo a ser minimizado: o makespan, ou seja, o tempo total de duração do projeto. Dessa forma, o que se espera deste objetivo é a minimização do tempo decorrido entre o início da primeira atividade e o fim da última atividade. O que pode ser comprovado em trabalhos como o de Bock e Patterson (2007).

Outro tipo de objetivo possível é a maximização do valor presente do projeto. Para Martins (2000), este objetivo se refere ao balanço entre as despesas para a execução das atividades e a receita obtida após a sua conclusão. Casos como esses também podem ser encontrados em trabalhos de Herroelen e Leus (2005), entre outros.

Segundo Dimande (2011), o PSPRR padrão considera só um tipo de recursos o qual é conhecido como renovável. Porém, algumas variações desse problema podem considerar outros tipos de recursos em um projeto. Os recursos utilizados podem ser classificados, segundo Coelho (2004), em quatro categorias, sendo elas: renovável, não renovável, duplamente restrito e parcialmente restrito. Quando o recurso é renovável, ele é limitado em quantidade, mas reutilizado de período a período, por exemplo, mão de obra e máquinas. O recurso é não renovável quando a soma do recurso analisado é limitada para o projeto como um todo, não havendo renovação por período, como por exemplo, valores monetários e matérias primas. Ele ainda pode ser duplamente restrito, quando o recurso destinado ao projeto é limitado duplamente, na soma total e por período. Pode ser também parcialmente restrito, quando a disponibilidade se renova em intervalos específicos de tempo. Este tipo de recurso pode ser visto como um tipo genérico de todos os tipos de recursos. Dessa forma, um

projeto pode apresentar um único tipo de recurso ou múltiplos tipos de recursos, presentes em artigos como Ichihara (2002).

Brucker e Knust (2000) consideram que é possível dividir o horizonte de planejamento em sucessivos intervalos de tempo. Consideram também que as atividades do projeto podem ser particionadas e que as partes das atividades diferentes podem ser executadas simultaneamente. No entanto, as partes de uma mesma atividade devem ser executadas de uma maneira sequencial. Sendo assim, o problema consiste em determinar quais as partes das atividades que poderão ser executadas simultaneamente dentro de um mesmo intervalo, obedecendo às restrições de recursos e precedência e com o intuito de minimizar o tempo total de execução do projeto.

Carlier e Néron (2003) também consideram que o horizonte de planejamento pode ser dividido em sucessivos intervalos de tempo e que as atividades de um projeto podem ser particionadas. No entanto, as partes das atividades são executadas em intervalos consecutivos de tempo, não podendo mais ser executadas simultaneamente.

Para os principais problemas de minimização e duração das atividades, Patterson et al. (1990) apresentam uma solução que busca resolver esses problemas em uma rede de atividades com recursos limitados.

Kim et al. (2009) apresentam um algoritmo genético que simula uma busca para encontrar uma solução ideal para o problema de alocação de recursos. O resultado inicial encontrado é transferido para outro algoritmo para realizar a busca local do melhor resultado para o problema. Pesquisas realizadas pelos autores apontam que a aplicação do algoritmo pode ser ampliada para grandes PSPRR.

Para Reyck et al. (1998), a solução para minimizar o makespan é dada através das relações de precedência generalizadas. A solução estabelece um tempo mínimo e máximo arbitrário que fica entre o inicio e a conclusão das atividades. Para isso, apresenta um algoritmo do tipo Branch-and-Bound, onde uma árvore de recursos e atividades da rede original do projeto é estendida com relações de precedência extras para resolver uma série de conflitos de recursos.

De acordo com Demeulemeester e Herroelen (2002), o caminho para minimizar a duração do projeto é por meio de uma árvore de possíveis soluções. Para isso, a solução se baseia em uma rede de precedência de atividades e recursos disponíveis. Os autores tratam o PSPRR como um problema de agendamento de recursos restritos. O objetivo é sequenciar as atividades sujeitas às restrições de

precedência e de recursos. O algoritmo explora a ideia de sequenciar as atividades na data mais cedo possível, sendo possível a execução na data mais tarde possível, desde que não viole as restrições do problema. Eles também apresentam testes relativos ao algoritmo.

A resolução do Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR) fundamenta-se em duas abordagens principais: os métodos heurísticos e os métodos exatos. Conforme Morillo et al. (2014), as heurísticas primitivas são métodos iterativos de raciocínio simples que buscam a melhoria contínua da solução atual através de Regras de Prioridade e Esquemas de Geração de Cronograma, embora sua eficácia seja limitada em problemas de alta complexidade.

Em contrapartida, os métodos exatos utilizam técnicas analíticas e matemáticas, como a Programação Linear Inteira Mista (MIP) e o Branch and Bound, para garantir a obtenção de uma solução ótima. Entretanto, como apontado por Fahmy et al. (2014), esses métodos enfrentam o desafio da inviabilidade computacional à medida que a dimensão do problema aumenta, tornando o tempo de análise impraticável para cenários excessivamente complexos. No presente estudo, optou-se pela utilização de um modelo de Programação Linear Inteira Mista, implementado via software Gusek, para buscar a otimização no atendimento do Call Center.

3 METODOLOGIA

A estrutura metodológica deste trabalho foi desenvolvida com o suporte da ferramenta Metodika. A presente pesquisa caracteriza-se, quanto à sua natureza, como aplicada, uma vez que tem como objetivo a geração de conhecimento voltado à solução de um problema prático relacionado ao sequenciamento de atividades em ambientes operacionais. No que se refere à abordagem, o estudo adota um enfoque quantitativo, fundamentado na utilização de modelagem matemática e análise numérica dos dados. Em relação aos objetivos, a pesquisa é classificada como descritiva, pois busca analisar e compreender o comportamento do processo de atendimento em um Call Center, com foco na organização das atividades e na utilização dos recursos disponíveis.

A construção do referencial teórico foi realizada por meio de pesquisa bibliográfica, com levantamento de materiais nas bases de dados da CAPES, abrangendo artigos científicos, livros e teses relevantes à temática. Não houve delimitação temporal para as publicações, priorizando-se trabalhos clássicos e contemporâneos sobre o Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR), modelagem matemática, alocação de recursos, makespan e gestão da qualidade em serviços.

As buscas foram conduzidas a partir de palavras-chave em português e inglês, tais como “sequenciamento”, “resource constrained project scheduling problem”, “mathematical modeling”, “quality management” e “call center”.

O procedimento metodológico central consiste em um estudo de caso, desenvolvido em uma empresa do setor de atendimento ao cliente, denominada neste trabalho como “Alfa”, localizada no estado de Minas Gerais. A unidade de análise corresponde ao fluxo operacional de atendimento do Call Center, estruturado em 16 atividades, incluindo etapas sequenciais e simultâneas, desde o início do atendimento até sua finalização.

A coleta de dados foi realizada por meio de observação direta do processo, permitindo o levantamento dos tempos de processamento das atividades e das relações de precedência existentes entre elas. As observações foram conduzidas ao longo de um período determinado, contemplando múltiplas execuções do processo, com o objetivo de reduzir variações e garantir maior confiabilidade aos dados coletados. Os tempos das atividades foram posteriormente tratados por meio de medidas representativas, sendo utilizados como parâmetros de entrada no modelo matemático.

Os recursos considerados no estudo correspondem aos atendentes envolvidos no processo de atendimento, sendo modelados como recursos renováveis, com disponibilidade limitada ao longo do horizonte de planejamento. Assumiu-se que tais recursos são homogêneos, ou seja, possuem capacidade equivalente para execução das atividades, hipótese compatível com o contexto operacional analisado.

Para a resolução do problema, foi proposto um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), adaptado a partir de Vieira e Rola (2022), com o objetivo de minimizar o makespan, isto é, o tempo total de duração do processo. O modelo incorpora restrições de precedência entre atividades e limitações de disponibilidade de recursos, permitindo representar de forma estruturada o problema de sequenciamento.

A escolha da abordagem PLIM justifica-se pela sua capacidade de fornecer soluções ótimas para problemas de sequenciamento com restrições, sendo especialmente adequada para instâncias de pequeno e médio porte, como o caso analisado neste estudo. Embora métodos heurísticos apresentem menor custo computacional, optou-se pelo uso de um método exato visando maior precisão nos resultados.

A implementação computacional do modelo foi realizada por meio do software GLPK (GNU Linear Programming Kit), utilizando a interface Gusek. O processamento do modelo possibilitou a obtenção do sequenciamento ótimo das atividades, bem como das respectivas datas de início, respeitando todas as restrições impostas.

Para a análise dos resultados, foram considerados dois indicadores principais: (i) a duração total do processo (makespan) e (ii) a programação temporal das atividades, representada por meio de um Diagrama de Gantt. Esses elementos permitiram avaliar a eficiência do sequenciamento proposto em comparação ao fluxo operacional observado.

Por fim, a validação dos resultados foi realizada por meio da comparação entre o cenário atual do processo e o cenário otimizado, possibilitando identificar potenciais ganhos em termos de redução do tempo de atendimento e melhoria na utilização dos recursos. Dessa forma, a metodologia adotada assegura consistência analítica e aplicabilidade prática aos resultados obtidos.

Apresenta-se, neste capítulo, o modelo matemático desenvolvido para o Problema de Sequenciamento de Projeto com Restrição de Recurso, proposta por Vieira e Rola (2022) :

$$\min S_t \qquad (1)$$

$$x_{ij} = 1 \qquad \forall\,(i,j) \in E \qquad (2)$$

$$x_{jl} = 0 \qquad \forall\,(i,j) \in E \qquad (3)$$

$$S_j - S_i - p_i - x_{ij}\left(\sum_{i \in V} p_i\right) + \left(\sum_{i \in V} p_i\right) \geq 0 \qquad \forall\, i \in V \cup \{s\}, \forall\, j \in V \cup \{t\}, i \neq j \qquad (4)$$

$$f_{ijk} - (\max\{r_{ik}\}) \cdot x_{ij} \leq 0 \qquad \forall\, i \in V \cup \{s\}, \forall\, j \in V \cup \{t\}, \forall\, k \in R, i \neq j \qquad (5)$$

$$\sum_{j \in V \cup \{t\}} f_{ijk} = r_{ik} \qquad \forall\, i \in V \cup \{s\}, \forall\, k \in R,\ i \neq j \qquad (6)$$

$$\sum_{j \in V \cup \{s\}} f_{ijk} = r_{jk} \qquad \forall\, j \in V \cup \{t\}, \forall\, k \in R,\ i \neq j \qquad (7)$$

$$S_i \geq 0 \qquad \forall\, i \in V \cup \{s\} \cup \{t\} \qquad (8)$$

$$f_{ijk} \geq 0 \qquad \forall\, i \in V \cup \{s\}, \forall\, j \in V \cup \{t\}, \forall\, k \in R \qquad (9)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall\, i \in V \cup \{s\}, \forall\, j \in V \cup \{t\} \qquad (10)$$

Considerando:

V = {1, 2, …, n}: conjunto de n atividades do projeto;

R = {1, 2, …, m}: conjunto de m recursos renováveis;

E : conjunto das atividades cuja relação de precedência é conhecida a priori;

s e t: atividades fictícias que representam, respectivamente, o início e o fim do projeto;

rik: quantidade do recurso renovável k que a atividade i necessita para ser executada;

pi: tempo de processamento da atividade i;

$fijk$: fluxo do recurso k da atividade i para a atividade j;

xij: variável binária que estabelece se a atividade i precede a atividade j;

Si: data de início da atividade i.

A função objetivo (1) minimiza a data de início da atividade fictícia final t, consequentemente a duração total do projeto. As restrições (2) estabelecem as relações de precedência definidas a priori. O conjunto de restrições (3) fixam os valores das variáveis xji igual a zero quando a relação de precedência é estabelecida. O conjunto de restrições (4) representam as relações de sequenciamento entre as atividades. As restrições (5) definem o fluxo de recursos entre duas atividades. As restrições (6) e (7) representam que a quantidade de recurso renovável alocada para a execução de uma atividade deve ser a mesma a ser transferida para as atividades sucessoras. Por fim, as restrições (8), (9) e (10) representam os respectivos domínios das variáveis de decisão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Situada no estado de Minas Gerais, a empresa identificada como “Alfa”, foi desenvolvido com base no fluxo operacional de atendimento de um Call Center, cujo processo foi estruturado em 16 atividades, desde o início do atendimento até o encerramento e envio da pesquisa de satisfação ao usuário.

O processo analisado apresenta atividades sequenciais e simultâneas, envolvendo a interação entre sistemas automatizados e recursos humanos, característica típica de operações de atendimento ao cliente. Além disso, o elevado impacto do tempo de resposta e da alocação de atendentes na percepção da qualidade do serviço torna o Call Center um ambiente adequado para a aplicação do modelo proposto.

O processo de atendimento do Call Center analisado tem início com o contato do cliente junto à central, momento em que o sistema registra a solicitação e prepara o ambiente para o atendimento. Inicialmente, são realizadas de forma estritamente sequencial as etapas de acesso aos sistemas, filtragem automática da demanda e reconhecimento do usuário, as quais são fundamentais para a correta identificação do cliente e para o direcionamento inicial do atendimento. Na sequência, ocorre a classificação da demanda apresentada, seguida da confirmação de segurança, garantindo a autenticidade das informações antes do prosseguimento do atendimento. Essas etapas configuram um bloco de atividades sequenciais obrigatórias, pois dependem diretamente da conclusão das fases anteriores para que o atendimento possa avançar.

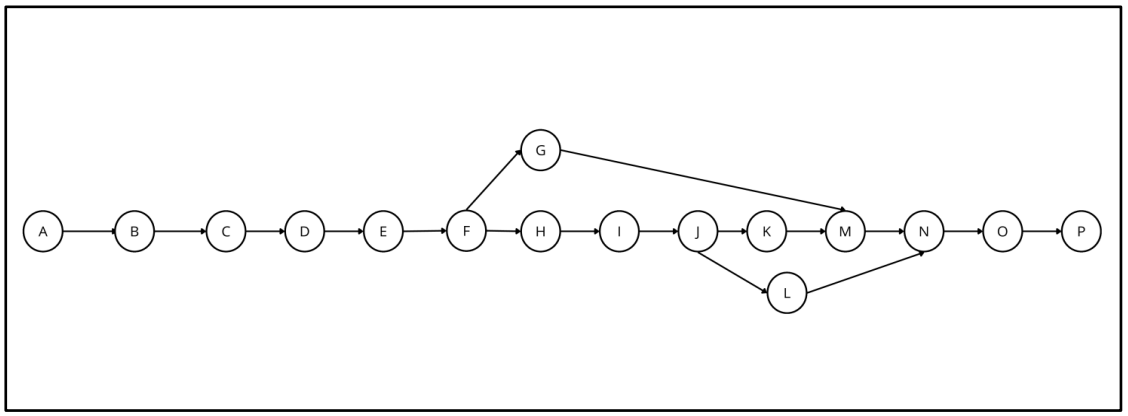
Após a validação das informações do usuário, o processo passa a incorporar atividades que podem ser executadas de forma simultânea. O registro das informações no sistema ocorre paralelamente ao início do suporte prestado pelo atendente, permitindo que dados relevantes sejam inseridos enquanto o atendimento ao cliente é realizado. De maneira complementar, a análise do problema pode ser conduzida em paralelo a essas ações, contribuindo para a agilidade na identificação da solução.

Em seguida, realiza-se a verificação do histórico do usuário no sistema, etapa necessária para subsidiar a tomada de decisão e que ocorre de forma sequencial em relação à análise do problema. Com base nessas informações, procede-se à resolução da solicitação, considerada uma das etapas mais críticas do processo, por demandar maior tempo de processamento e maior envolvimento do recurso humano.

Durante as etapas finais do atendimento, o registro formal por meio da geração de protocolo ou abertura de chamado pode ocorrer de forma simultânea às demais atividades administrativas. Após a resolução, a solução é comunicada ao usuário, consolidando o atendimento prestado. Na sequência, o atendimento é encerrado no sistema e o cliente é direcionado para a pesquisa de satisfação, etapa que permite a avaliação da qualidade do serviço oferecido. Por fim, o processo é concluído com o encerramento definitivo do atendimento.

Para uma melhor visualização, foi desenvolvido o grafo do projeto na Figura 1, que representa o processo com suas atividades e as relações de precedência entre elas.

Figura 1 - Grafo do projeto



Fonte: Autoria própria (2026)

A Tabela 1 identifica cada uma das atividades com seus respectivos tempos de processamento (duração).

Tabela 1 - Atividades no atendimento Call Center

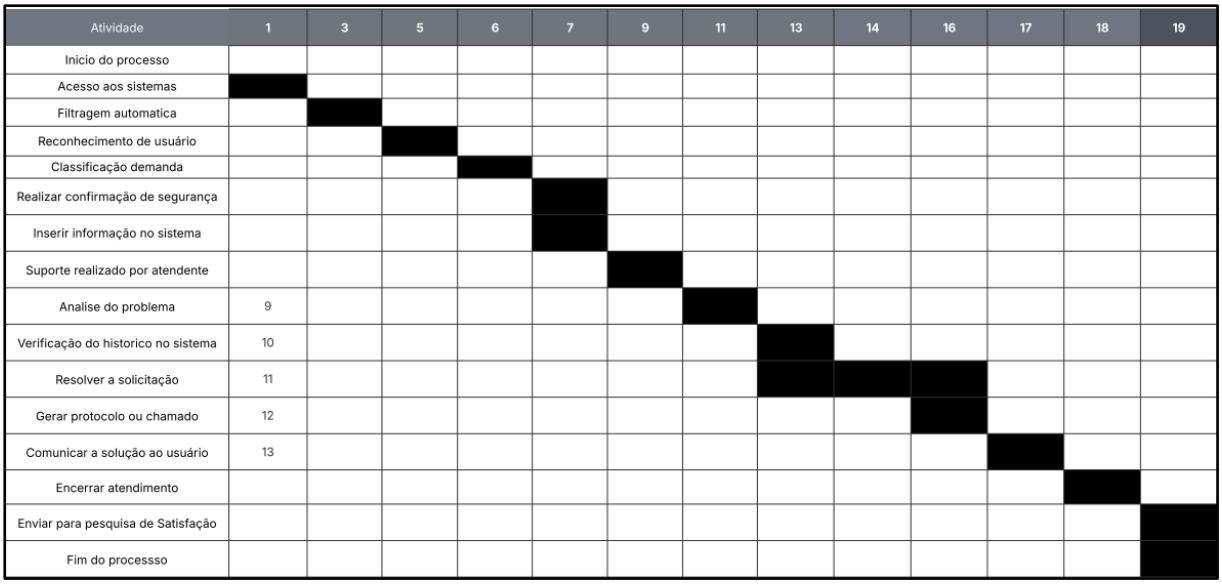
Código	Atividade	Duração	Dependência
A	Início do processo	-	-
B	Acesso aos sistemas	1 min	A
C	Filtragem automática	2 min	B
D	Reconhecimento de usuário	2 min	C
E	Classificação demanda	1 min	D
F	Realizar confirmação de segurança	1 min	E
G	Inserir informação no sistema	2 min	F
H	Suporte realizado por atendente	2 min	F
I	Analise do problema	2 min	H
J	Verificação do histórico no sistema	2 min	I
K	Resolver a solicitação	3 min	J
L	Gerar protocolo ou chamado	1 min	J
M	Comunicar a solução ao usuário	1 min	G e K
N	Encerrar atendimento	1 min	L e M
O	Enviar para pesquisa de satisfação	1 min	N
P	Fim do processo	-	O

Fonte: Autoria própria (2026)

Para a implementação dos dados apresentados e resolução do modelo matemático do Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR) aplicado ao processo de atendimento

do Call Center, utilizou-se o GLPK. A solução obtida, bem como o sequenciamento das atividades e a duração total do atendimento, em segundos, são mostrados pelo Diagramas de Gantt, na Figura 2, a seguir.

Figura 2 - Diagrama de Gantt



Fonte: Autoria própria (2026)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu analisar a problemática operacional dos Call Centers, caracterizada principalmente pela elevada variabilidade da demanda, pela necessidade de manutenção de altos níveis de serviço e pela forte dependência de recursos humanos. Ao longo do artigo, evidenciou-se que esses fatores, quando não adequadamente gerenciados, comprometem o desempenho do sistema, resultando em aumento dos tempos de espera, queda na qualidade do atendimento, elevação dos custos operacionais e impactos negativos sobre os operadores.

A análise realizada permitiu demonstrar a relevância da utilização da ferramenta de apoio à tomada de decisão para o planejamento adequado da capacidade, sequenciando as atividades e alocando os recursos de forma a otimizar o nível de serviço prestado.

Por fim, ressalta-se que o aprofundamento dessas análises pode contribuir de forma significativa para o desenvolvimento de práticas de gestão mais eficientes e sustentáveis no setor de Call Centers,

auxiliando organizações a enfrentar os desafios impostos por um ambiente cada vez mais competitivo e orientado à qualidade do serviço.

REFERÊNCIAS

CARPINETTI, Luiz Cesar Ribeiro. Gestão da qualidade: conceitos e técnicas. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

COELHO, J.P.F.. Modelo Genérico para Gestão de Projetos: SATPSP. Tese de Doutorado. Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2004.

BŁAŻEWICZ, J.; LENSTRA, J. K.; RINNOOY KAN, A. H. G. Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity. Discrete Applied Mathematics, Amsterdam, v. 5, n. 1, p. 11–24, 1983.

BOCK, D. B., PATTERSON, J.. A Comparison of Due Date Setting, Resource Assignment, and Job Preemption Heuristics for the Multi-project Scheduling Problem. Decision Sciences. Vol. 21, Issue2. pp. 384 - 402, 2007.

BRUCKER, P. e KNUST, S.. A Linear Programming and Constraint Propagation-Based Lower Bound for the RCPSP. European Journal of Operational Research, v.127, p.355-362, 2000.

BRUCKER, P., DREXL, A., MÖHRING, R., NEUMANN, K. e PESCH, E.. Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods. European Journal of Operational Research. Volume 112, Issue 1, Pages 3-41, 1999.

CARLIER, J. e NÉRON, E.. On linear bounds for the resource constrained project scheduling problem. European Journal of Operacionational Research, September, 2003.

DEMEULEMEESTER, E. e HERROELEN, W.. A branch-and-bound procedure for the multiple resource-constrained project scheduling problem. Management Science, 38, pp. 1803-1818, 2002.

DIMANDE. C. D.. Aceleração de projeto com recursos restritos mediante interrupção de atividades. Tese de Doutorado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós- graduação e pesquisa em Engenharia, 2011.

FAHMY, A.; HASSAN, T. M.; BASSIONI, H.. Improving RCPSP solutions quality with Stacking Justification – Application with particle swarm optimization. Expert Systems with Applications, 41, p. 5870–5881, 2014.

GANS, Noah; KOOLE, Ger; MANDELBAUM, Avishai. Telephone call centers: tutorial, review, and research prospects. Manufacturing & Service Operations Management, Linthicum, v. 5, n. 2, p. 79–141, 2003.

GARVIN, David A. Competing on the eight dimensions of quality. Harvard Business Review, Boston, v. 65, n. 6, p. 101–109, 1987.

HERROELEN, W., LEUS, R.. Project Scheduling Under Uncertainty: Survey and Research Potentials. European Journal of Operational Research 165, p. 289-306, 2005.

ICHIHARA, J. A.. O problema de programação de projetos com Restrição de recursos (resource-constrained Project scheduling problem). XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção Curitiba - PR, 2002.

JOHNSTON, Robert; CLARK, Graham. Service operations management: improving service delivery. 3. ed. Harlow: Pearson Education, 2008.

JURAN, Joseph M.; GODFREY, A. Blanton. Juran's quality handbook. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

KIM, Y. K; SONG, W. S.; KIM J. H.. A mathematical model and a genetic algorithm for two-sided assembly line balancing. Computers & Operations Research, v. 36, p. 853-865, 2009.

MARTINS, S. V.. Gerenciamento de Projeto: Meta-Heuristicas para Otimização do Escalonamento de Atividades na Exploração e Produção de Petróleo. Tese de Doutorado - Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2000.

MINGOZZI, A., MANIEZZO, V., RICCIARDELLI, S. e BIANCO, L.. An Exact Algorithm for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem Based on a New Mathematical Formulation, Management Science, v. 44, p.714-729, 1998.

MORILLO, D.; MORENO, L.; DÍAZ, J.. Metodologías Analíticas y Heurísticas para la Solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPSP): una revisión. Parte 1. Revista Ingeniería y Ciencia, 10, Núm. 20, 2014.

ORTIZ-PIMIENTO, N. R.; DÍAZ-SERNA, F. J. An Optimization Model to Solve the Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) in New Product Development Projects. 2020.

PATTERSON, J. H., TALBOT, F., SLOWINSKI, R. E WEGŁARZ, J.. Computational experience with a backtracking algorithm for solving a general class of precedence and resource-constrained scheduling problems, European Journal of Operational Research, Volume 49, Issue 1, 1990.

PARASURAMAN, A.; ZEITHAML, Valarie A.; BERRY, Leonard L. SERVQUAL: a multiple-item scale for measuring consumer perceptions of service quality. Journal of Retailing, New York, v. 64, n. 1, p. 12–40, 1988.

REYCK, B., HERROELEN, W. e DEMEULEMEESTER, E.. Resource-constrained project scheduling: A survey of recent developments, Computers & Operations Research, Volume 25, Issue 4, 1998.

VIEIRA, C. da S.; ROLA, F. S. C. Proposições de modelos matemáticos para o problema de sequenciamento em projetos com restrição de recursos e análise de desempenho. REVISTA FOCO, v. 17, n. 6, p. 01–17, jun. 2024. Disponível em: <https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/5350>. vii, viii, 2, 7, 11, 14, 17, 20, 25

Capítulo 4

10.37423/260911340

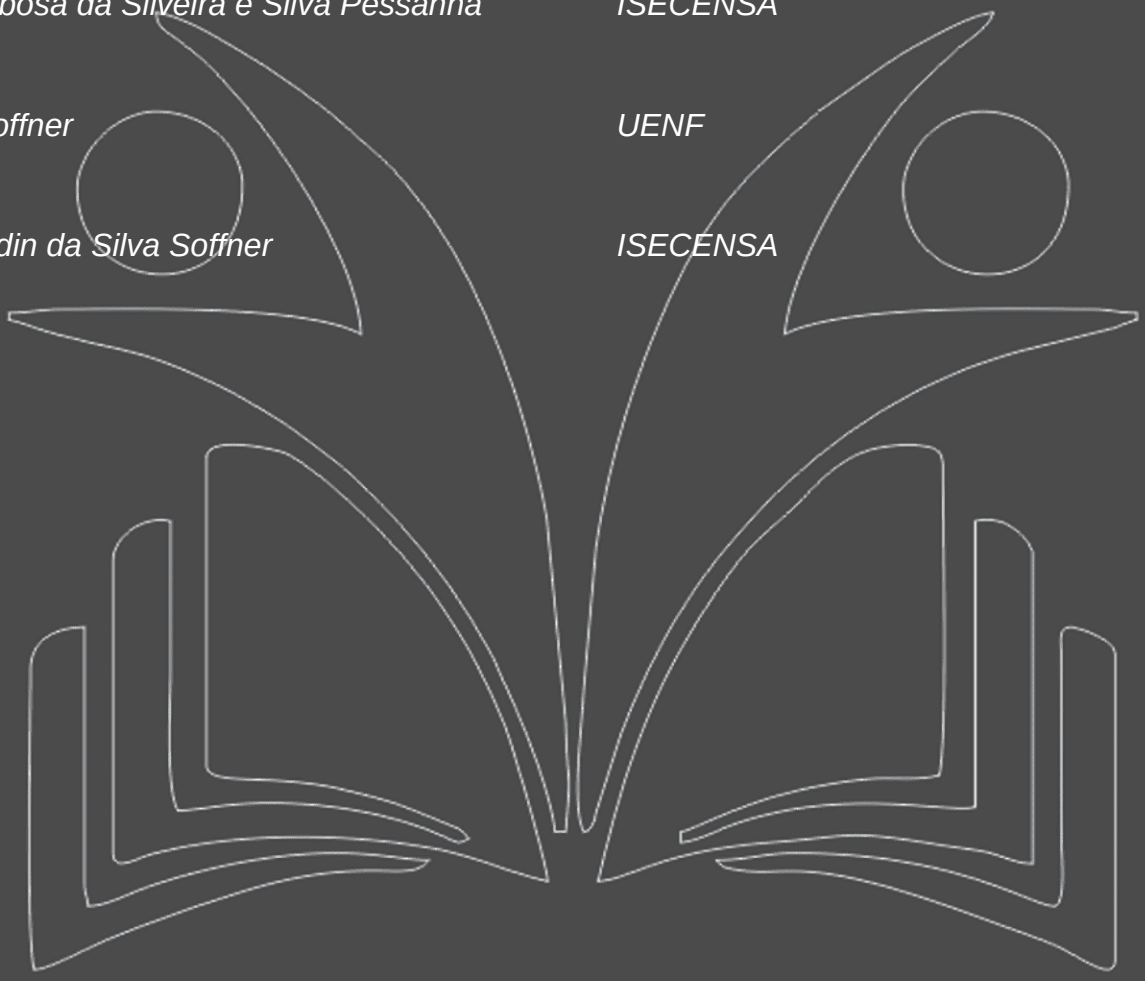
ADERÊNCIA E ESTABILIDADE DE FILMES DE CNTS EM AÇO SAE 1020 VIA DEPOSIÇÃO ELETROFORÉTICA

Emanuel Silva de Oliveira — *ISECENSA*

Geanni Barbosa da Silveira e Silva Pessanha — *ISECENSA*

Max Erik Soffner — *UENF*

Layzza Tardin da Silva Soffner — *ISECENSA*



RESUMO

Os nanotubos de carbono (CNTs) têm sido amplamente estudados devido às suas propriedades mecânicas, estruturais e elétricas, o que os torna candidatos promissores para a formação de revestimentos protetores em metais suscetíveis à corrosão. Entre as técnicas disponíveis, a deposição eletroforética (EPD) destaca-se por sua simplicidade e capacidade de produzir filmes uniformes a partir de suspensões estáveis. Neste trabalho, investigou-se a formação, aderência e estabilidade de filmes de CNTs depositados sobre aço Society of Automotive Engineers (SAE) 1020 por meio da EPD, considerando diferentes condições superficiais do substrato e distintas formulações de suspensão. Foram preparadas soluções contendo CNT funcionalizado e não funcionalizado dispersos em água deionizada ou acetona, com adição de iodeto de potássio (KI) para otimizar a condutividade. Os resultados demonstraram que a suspensão composta por acetona e CNT não funcionalizado apresentou melhor estabilidade e homogeneidade. Verificou-se também que a condição superficial do aço exerce influência direta na qualidade da deposição, superfícies limpas permitiram a formação de filmes contínuos e aderentes, enquanto presença de óleo ou corrosão comprometeu totalmente o revestimento. Conclui-se que a EPD é uma técnica eficiente para obtenção de películas de CNT em aço 1020, desde que haja controle adequado da suspensão e preparação rigorosa do substrato.

Palavras-chave: SAE 1020; Nanotubos de Carbono; Deposição eletroforética; Nanomateriais.

1 INTRODUÇÃO

Entre os diversos materiais estudados nas últimas décadas, os nanotubos de carbono (CNTs) têm se destacado por sua versatilidade e pelas notáveis propriedades eletrônicas, despertando crescente interesse em diferentes áreas de pesquisa e aplicação tecnológica. Dependendo dos índices de Hamada (n,m), que é um par de números inteiros usado para descrever a forma estrutural e a direção de enrolamento do CNT, podem apresentar comportamento de semicondutores de gap nulo ou metálica, quando n-m (componentes de vetor), forem múltiplos de 3 (Herbst; Macêdo; Rocco, 2004).

Os CNTs podem ser classificados em nanotubos de carbono de camada simples (SWCNTs), nanotubo de carbono multicamadas (MWCNTs) ou nanotubo de carbono de parede dupla (DWCNTs), cada qual com propriedades específicas. Nanotubos funcionalizados se destacam por propriedades mecânicas e eletrônicas superiores, sendo aplicáveis em sensores, compósitos e revestimentos. Diante dessas características, torna-se essencial empregar um método eficiente de deposição desses nanomateriais, destacando-se entre eles a técnica de deposição eletroforética (Syduzzaman et al., 2025).

O sistema de deposição eletroforética (EPD) é constituído fundamentalmente por uma fonte de alimentação, um ânodo, um cátodo e uma suspensão estável. Essa técnica é amplamente empregada na mitigação da corrosão. A EPD corresponde ao processo eletroquímico no qual partículas carregadas, dispersas em suspensão, migram e se depositam sobre um substrato de carga oposta mediante a aplicação de um campo elétrico (ScienceDirect, 2022).

A EPD é valorizada por sua simplicidade, baixo custo e tempos de depósitos relativamente curtos. Essa técnica envolve a aplicação de diferentes potenciais entre eletrodos, sendo usada para fabricar revestimentos em diversos materiais, como polímeros, cerâmicas e nanomateriais (Zica, 2013).

O processo consiste na migração de partículas carregadas em um meio líquido sob a influência de um campo elétrico, permitindo uma deposição controlada sobre um substrato. Além disso, ela dispensa o uso de ligantes e permite a aplicação em larga escala, sendo uma alternativa promissora para o uso industrial de nanomateriais condutores (Zica, 2013).

Para avaliar a qualidade dos revestimentos aplicados, é essencial caracterizar sua morfologia, aderência e resistência à corrosão. Técnicas complementares são empregadas com esse fim, proporcionando uma visão detalhada das propriedades do filme protetor (Gobbo, 2009).

A difração de Raios X (DRX) é uma técnica não destrutiva amplamente estabelecida para a análise de materiais carbonosos, possibilitando a medição reprodutível de seus parâmetros estruturais. Além disso, é largamente empregada para identificar fases cristalinas, permitindo uma avaliação rápida e eficiente das estruturas depositadas, sendo, portanto, uma ferramenta essencial no controle de diversos processos industriais (Machado et al., 2011).

Com base nos temas previamente discutidos, definiu-se que o objeto de estudo será centrado no aço SAE 1020 e nas técnicas de revestimento protetor empregadas nesse material.

1.1 Objetivo geral

Obter uma película de nanotubo de carbono via deposição eletroforética em superfície de aço SAE 1020 para que seja depositada como revestimento protetor.

1.1.1 Objetivos específicos

- Analisar a eficiência da mistura utilizada na dispersão dos CNTs;
- Verificar a aderência da película no aço SAE 1020;
- Investigar o comportamento da deposição eletroforética sob diferentes condições superficiais do aço SAE 1020.

1.2 Justificativa

A relevância desta pesquisa justifica-se pela necessidade de desenvolver películas protetoras capazes de contribuir para o avanço tecnológico e para o aumento da vida útil dos materiais. Ao considerar a aderência e a homogeneidade da película como fatores determinantes no desempenho do revestimento, estabelecem-se parâmetros que orientam sua replicação e otimização.

Diante da necessidade de desenvolver revestimentos inovadores capazes de elevar a resistência à corrosão de materiais metálicos, propõe-se contribuir para a redução dos custos operacionais e para o aprimoramento da eficiência dos processos industriais.

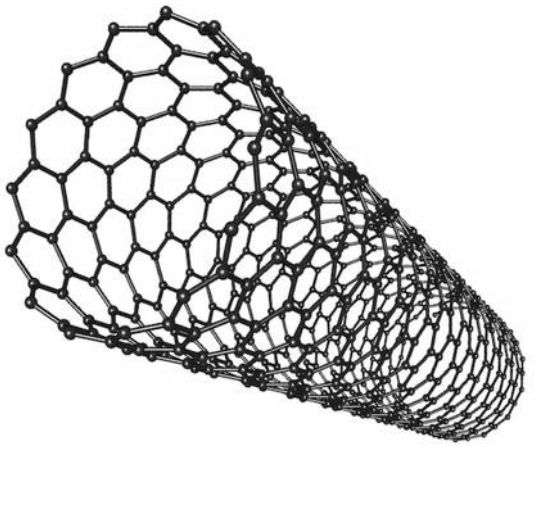
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Nanotubos de carbono

Os nanotubos de carbono (CNTs) são estruturas derivadas do grafite, cuja composição se baseia em folhas de átomos de carbono organizadas em uma rede bidimensional, conhecidas como grafeno. Os CNTs são formados quando essas folhas de grafeno são enroladas de forma cilíndrica e com isso ganhando suas propriedades mecânicas (altíssima resistência mecânica e elevado módulo de elasticidade), estruturais e eletrônicas (alta condutividade térmica) (Franco, 2009).

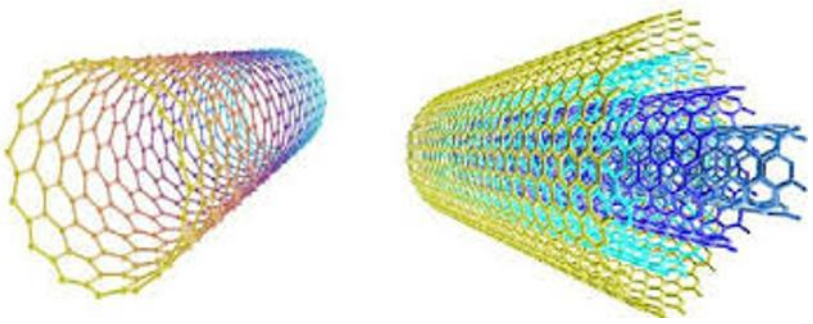
Os nanotubos podem ser classificados estruturalmente em duas categorias: Nanotubos de carbono de camada simples (SWCNT) (Figura 1), formados por uma única camada de grafeno, e nanotubos de carbono multicamadas (MWCNT) e são considerados estruturas unidimensionais (Figura 2), compostos por várias camadas concêntricas de grafeno enroladas. Com diâmetros na escala dos nanômetros e comprimentos que podem atingir micrômetros (Franco, 2009).

Figura 1: Formação do nanotubo de carbono.



Fonte: KINTEK Solution, 2023.

Figura 2: SWCNT (a); MWCNT (b).



Fonte: Rodrigues, 2015.

A descoberta dos nanotubos de carbono abriu espaço para a integração de diversas áreas do conhecimento, promovendo uma abordagem interdisciplinar e multidisciplinar. Isso é especialmente evidente na análise das propriedades eletrônicas e mecânicas de nanotubos funcionalizados, ou seja, CNTs cujas superfícies foram quimicamente modificadas (Souza Filho; Fagan, 2007).

Essas modificações tornam os nanotubos capazes de interagir de forma mais eficaz com moléculas orgânicas e biológicas, permitindo o desenvolvimento de sensores altamente seletivos, capazes de detectar pequenas quantidades de substâncias-alvo com grande precisão, diferente dos não funcionalizados (Souza Filho; Fagan, 2007).

Considerando o potencial dos nanotubos funcionalizados e a crescente demanda por soluções tecnológicas baseadas em materiais avançados, o Brasil tem ampliado seus esforços de pesquisa nessa área. Um exemplo significativo é o projeto iniciado em 2004, pelo Grupo de Materiais Condutores do Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que visa à implantação de técnicas nacionais de produção, purificação e funcionalização de CNTs (Herbst; Macêdo; Rocco, 2004).

A proposta é alinhar o país às tendências globais, promovendo o desenvolvimento de nanotubos adaptados a aplicações específicas, como sensores, compósitos e dispositivos eletroquímicos, incluindo pilhas a combustível. O uso de sólidos ácidos como suportes catalíticos na síntese desses nanotubos é um dos focos iniciais do projeto, o que evidencia o compromisso com a inovação e a independência tecnológica nacional no campo da nanotecnologia (Herbst; Macêdo; Rocco, 2004).

2.2 Deposição eletroforética

Com o avanço das tecnologias de processamento de materiais, muitas técnicas de aplicação de revestimentos têm ganhado destaque, como a Deposição Eletroforética (EPD), que se apresenta como uma alternativa promissora em relação a técnicas mais tradicionais, como o CVD (Chemical Vapor Deposition), que produzem subprodutos tóxicos e o dip coating, que apresenta instabilidade de aderência e uniformidade (Jian et al., 2017; Kintek Solution, 2024; Ossila, 2025).

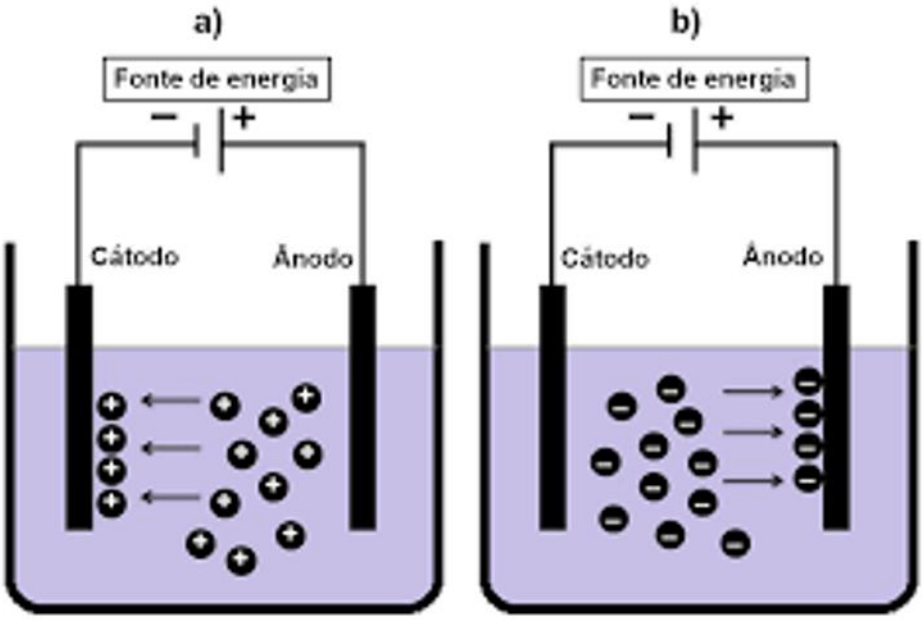
A EPD é uma técnica de processamento simples, custo relativamente baixo e aplicável a diversas situações. O processo de EPD consiste na dispersão ou suspensão de partículas coloidais carregadas em um meio líquido, as quais são atraídas e depositadas sobre um substrato condutor eletricamente, com carga oposta, quando submetidas a um campo elétrico (Jian et al., 2017).

Para realizar o processo de EPD são utilizados 2 eletrodos, um de trabalho e um contra-eletrodo, inserido paralelamente em uma suspensão de partículas armazenadas em um reservatório (Figura 3), e uma fonte de tensão de diferente potencial entre os eletrodos no recipiente (Franco, 2009). Esse processo ocorre em 2 etapas:

- Na primeira etapa, o campo elétrico gerado pela tensão aplicada entre os eletrodos impulsiona as partículas em suspensão a se deslocarem em direção ao eletrodo de carga oposta, caracterizando o fenômeno da eletroforese.

- Na segunda etapa, as partículas são retidas no eletrodo, onde se acumulam e formam um depósito por meio da aglutinação.

Figura 3: Processo EPD: a) sobre o cátodo e b) sobre o ânodo.



Fonte: Oliveira et al., 2020.

A EPD se destaca como uma alternativa mais viável, devido à simplicidade de seus métodos, ao baixo custo e à facilidade de aplicação em larga escala na produção de dispositivos baseados em nanotubos de carbono (Franco, 2009).

2.3 Aço SAE 102

O aço SAE 1020 é um material de fácil conformação mecânica, pois apresenta características de alta ductilidade, plasticidade e soldabilidade. Por esses motivos é muito conhecido e utilizado na indústria, na fabricação de peças e ferramentas, tendo em vista o seu baixo custo (Figura 4). Devido a sua baixa concentração de carbono, aproximadamente 0,2% C, é o mais utilizado na indústria (Araújo, 2010; Silva Júnior, 2017).

Figura 4: Valor do aço SAE 1020 em 2025.



Fonte:Painel constru, 2025.

Os aços de alta resistência e baixa liga (High Strength Low Alloy) destacam-se por apresentarem elevada resistência mecânica, boa ductilidade e soldabilidade superior em relação aos aços processados por laminação convencional. Essas características os tornam especialmente relevantes em aplicações que exigem desempenho estrutural aliado à confiabilidade (Santos et al., 2015).

Um dos principais desafios de utilizar o aço carbono é sua baixa resistência à corrosão, gerando prejuízos econômicos e comprometendo a segurança de estruturas metálicas. Os aços, amplamente utilizados em diversos setores industriais e petrolíferos, são particularmente suscetíveis a esse processo. A deterioração ocorre na interface entre o metal e o ambiente, sendo influenciada por fatores como pH, umidade relativa do ar e concentração de substâncias corrosivas (Waters; Tatum; Hugh, 2014).

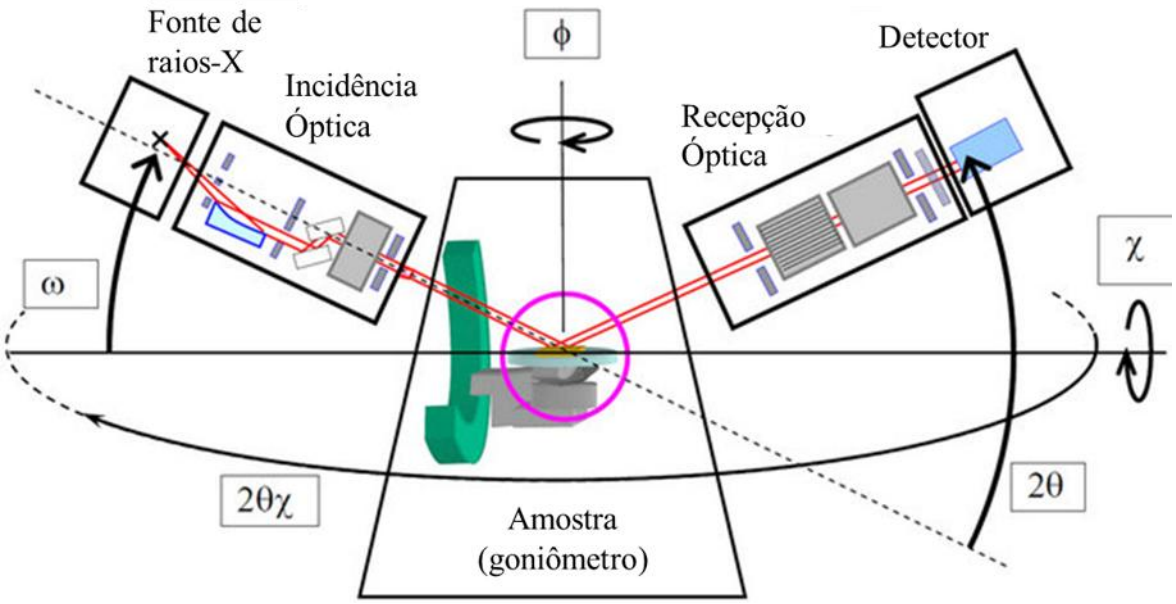
Para reduzir os efeitos da corrosão, uma das soluções adotadas é a aplicação de revestimentos protetores, capazes de formar barreiras físicas entre o metal e o meio externo. Essas barreiras reduzem significativamente a taxa de deterioração, aumentando a vida útil dos materiais, diminuindo perdas e os custos com manutenção (Chang et al., 2014).

2.4 Técnicas de caracterização dos revestimentos

Para compreender melhor as características e propriedades químicas, como composição, recorre-se à Difração de Raios X (DRX) e ao microscópio óptico. Tais análises demonstram a importância do uso de barreiras protetoras, que atuam na preservação da estrutura cristalina e na minimização de defeitos associados ao envelhecimento e à exposição ao meio (Githinji, 2016).

A difração de raios X mostrada na Figura 5, é uma técnica de caracterização não destrutiva de materiais, empregada para determinar as propriedades estruturais e físicas de diferentes compostos. Seu princípio baseia-se na análise dos padrões de difração gerados quando os raios X interagem de forma construtiva com a amostra (Xavier, 2023).

Figura 5: Ensaio da técnica de DRX.



Fonte: Central Multiusuário DF, 2025.

A organização e a periodicidade dos átomos no material resultam em distintos padrões de sinais, os quais são registrados pelo detector e utilizados para a elaboração de um difratograma, semelhante a uma “impressão digital” do material. Os picos presentes neste difratograma surgem quando o comprimento de onda da radiação incidente corresponde às distâncias interatômicas dos cristais que compõem o material (Xavier, 2023).

Já o microscópio óptico é um instrumento destinado à ampliação e observação de estruturas microscópicas, isto é, difícil ou totalmente invisível a olho nu. O microscópio ótico, em particular, utiliza luz visível e um conjunto de lentes de vidro para produzir a ampliação da imagem da amostra. Sua constituição envolve uma parte mecânica, responsável pelo suporte e pela estabilidade do equipamento, e uma parte óptica, encarregada da formação e ampliação da imagem. A iluminação pode ser ajustada por meio do reóstato, que controla diretamente a intensidade da fonte luminosa, ou de forma indireta, através da regulação do condensador e do diafragma (Gomes, 2005).

A intensidade luminosa aumenta quando o condensador é elevado e o diafragma é aberto, permitindo maior passagem de luz para a amostra; inversamente, diminui quando o condensador é abaixado e o diafragma é fechado. Esses ajustes são essenciais para obter uma visualização adequada, garantindo contraste, nitidez e definição compatíveis com a ampliação desejada (Gomes, 2005).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza experimental, com abordagem qualitativa, e apresenta objetivos descritivos e aplicados. A adoção da abordagem qualitativa fundamenta-se na necessidade de compreender, sob uma perspectiva interpretativa, os comportamentos, padrões e particularidades dos filmes de CNT depositados sobre o aço SAE 1020, considerando aspectos relacionados à aderência, à homogeneidade e à estabilidade obtidos por meio da técnica de deposição eletroforética.

Os experimentos foram conduzidos em ambiente laboratorial controlado, empregando procedimentos de observação sistemática, registro descritivo e análise interpretativa das características observadas. As técnicas de caracterização utilizadas forneceram suporte à avaliação qualitativa dos revestimentos, permitindo identificar tendências, variações e comportamentos intrínsecos às propriedades dos filmes analisados.

3.1 Materiais

Para a montagem da técnica EPD foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos: um béquer de 50 mL, duas placas de vidro como suporte e quatro corpos de prova de aço SAE 1020 que serviram como substrato metálico para a deposição. O contato elétrico foi estabelecido por meio de fios de cobre, conectores de pino e conectores tipo jacaré, garantindo a fixação adequada no sistema. Utilizou-se o contra eletrodo e uma chapa de grafite, conectada a uma fonte de alimentação MINIPA MPL-3305M.

Em relação aos insumos químicos, foram utilizados nanotubos de carbono multicamadas (MWCNTs) como fase dispersa, acetona P. A. como solvente e iodeto de potássio (KI) como eletrólito, favorecendo a dispersão e a condução elétrica durante o processo de deposição.

Os nanotubos de carbono utilizados foram do tipo multicamadas (MWCNTs), conforme a Figura 6. Para a preparação da suspensão, foram adicionados 0,050 g de MWCNTs em 50 mL de acetona, juntamente com 0,415 g de iodeto de potássio (KI), empregado como eletrólito para favorecer a deposição eletroforética.

Figura 6: Pó de CNT e Iodeto de potássio.



Fonte: Autor.

O nanotubo de carbono utilizado apresenta pureza superior a 90%, garantindo menor presença de impurezas que poderiam interferir nos resultados. Possui diâmetro médio de cerca de 20 nm e comprimento aproximado de 12 µm, fornecidos pelo fabricante.

O iodeto de potássio utilizado, da marca Vetec, apresenta pureza aproximada de 99%, assegurando a qualidade do reagente e a confiabilidade dos resultados obtidos nos experimentos.

A acetona P. A. utilizada como solvente nos testes apresenta uma pureza de 100%.

3.2 Equipamentos

Os equipamentos utilizados incluíram uma balança de precisão, empregada para a correta pesagem dos reagentes utilizados nas soluções. Para o processo de dispersão dos nanotubos de carbono, foi utilizado um equipamento de ultrassom, garantindo a homogeneização da suspensão antes da deposição. A fonte de alimentação MINIPA MPL-3305M foi utilizada para fornecer a tensão e corrente necessárias ao processo de deposição eletroforética. Foi utilizado o microscópio FORTEL para observar a superfície do corpo de prova a fim de verificar a homogeneidade da película.

3.3 Métodos

O primeiro passo consistiu na confecção de 10 corpos de prova dos quais quatro corpos serviram como análises finais, produzidos em formato retangular com dimensões de 60 mm × 20 mm × 3 mm, conforme mostra a Figura 7. Para o corte inicial das amostras, utilizou-se uma serra de mão. Em seguida, foram preparados por meio de lixamento progressivo com lixas de granulação de G 200 a G 1200, com o objetivo de remover impurezas, uniformizar e padronizar a superfície metálica antes da aplicação do revestimento criando um perfil de ancoragem leve a moderado (Ra entre 0,2 e 1,0 µm).

Figura 7: Corpos de prova.



Fonte: Autor.

Após o lixamento, uma das amostras foi limpa com álcool para remoção de poeira, partículas soltas e traços orgânicos, sendo posteriormente deixada para secagem ao ar, enquanto outra foi submetido ao tempo para que ocorresse a corrosão da superfície e outras duas foram submersas em óleo fino e com baixa viscosidade.

Para encontrar a melhor solução foram realizados diferentes testes,Tabela 1, variando o tipo de solvente e o estado de funcionalização do material. Em todos os ensaios, a massa de CNT utilizada foi mantida constante em 0,050 g e o iodeto foi mantido em 0,415 g. O principal objetivo dessa etapa foi identificar o sistema que proporcionasse a melhor homogeneidade da suspensão, condição essencial para a eficiência do processo de deposição eletroforética.

Tabela 1: Testes de solução.

Teste	Iodeto de potassio (g)	CNT (g)	Solvente (ml)	Tempo
1	KI (0,415 g)	Funcionalizado (0,050 g)	Água deionizada (50 ml)	15 min
2	KI (0,415 g)	Não funcionalizado (0,050 g)	Água deionizada (50 ml)	15 min
3	KI (0,415 g)	Funcionalizado (0,050 g)	Acetona (50 ml)	15 min
4	KI (0,415 g)	Não funcionalizado (0,050 g)	Acetona (50 ml)	15 min

Fonte: Autor.

A mistura obtida foi submetida a um processo de dispersão em ultrassom por 15 minutos (Figura 8), com o objetivo de promover a dispersão dos nanotubos e garantir uma suspensão homogênea, adequada para o processo de EPD.

Figura 8: Dispersão do CNT.



Fonte: Autor.

A etapa seguinte consistiu na montagem do sistema de deposição eletroforética (EPD), ilustrada na Figura 9. Para isso, duas placas de vidro foram posicionadas dentro de um béquer de 50 mL com uma distância de 30 mm entre eles, servindo como suporte para os eletrodos.

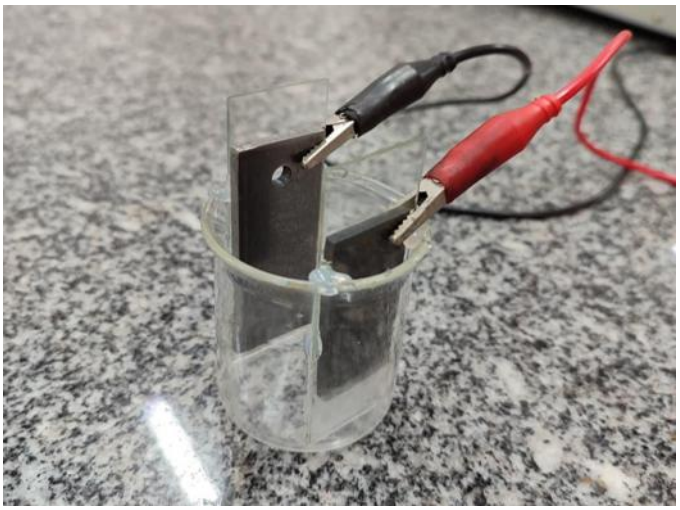
Figura 9: Montagem da EPD.



Fonte: Autor.

Na Figura 10, observa-se a chapa de grafite posicionada, atuando como ânodo (ligada ao fio vermelho, positivo), enquanto o corpo de prova de aço SAE 1020, funcionando como cátodo (ligado ao fio preto, negativo). No interior do béquer, foi adicionada a suspensão previamente preparada contendo os nanotubos de carbono. A fonte de alimentação foi configurada para 30 V durante 3 minutos, completando o circuito entre os dois eletrodos.

Figura 10: Posição dos cabos.



Fonte: Autor.

As deposições foram realizadas de forma sistemática, assegurando a reprodutibilidade do processo em diferentes tipos de superfícies, tanto limpas quanto contaminadas. A capacidade amostral de distintas

interfaces possibilitou a obtenção de resultados variados, refletindo a influência das condições superficiais no desempenho do revestimento.

A fim de verificar a aparência da película formada, utilizou-se um microscópio Fortel, Figura 11, com aproximação de 20× para observar sua morfologia da película formada

Figura 11: Microscópio FORTEL.



Fonte: Autor.

Com o objetivo de avaliar a aderência e a fixação do filme depositado, o corpo de prova revestido foi submetido ao ensaio de adesão por fita adesiva, conforme a norma ASTM D3359. Esse método é amplamente utilizado para verificar a resistência do revestimento à remoção mecânica por tração.

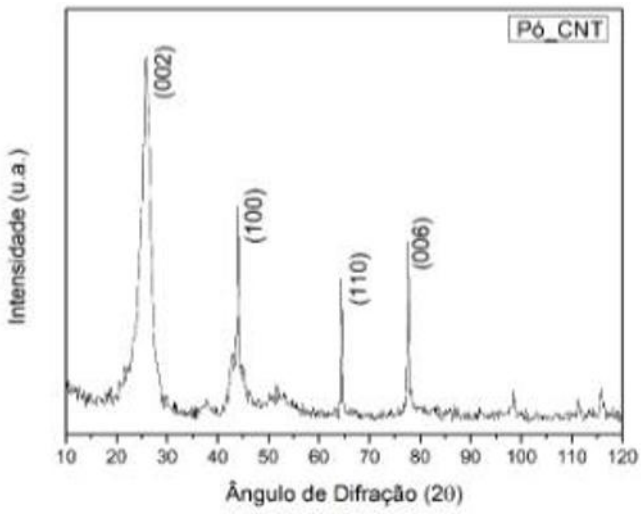
A norma ASTM D3359 descreve dois procedimentos de ensaio, sendo o mais comum o Método B (cross-cut). O procedimento consiste em realizar uma série de cortes paralelos no revestimento utilizando um estilete ou cortador padronizado, seguidos da realização de outra série de cortes perpendiculares, formando uma grade (cross-hatch). Em seguida, aplica-se uma fita adesiva padronizada sobre a área seccionada, pressionando-a de modo uniforme para garantir total contato. A fita é então removida com um movimento rápido e contínuo, formando um ângulo de aproximadamente 180° em relação à superfície (ASTM International, 2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do nanotubo de carbono

A caracterização do pó de CNT por Difração de Raios X (DRX), apresentada na Figura 12, evidenciou picos bem definidos em torno de 2θ = 26°, 43°, 54° e 78°, correspondentes aos planos cristalográficos (002), (100), (110) e (006), respectivamente.

Figura 12: DRX do CNT.



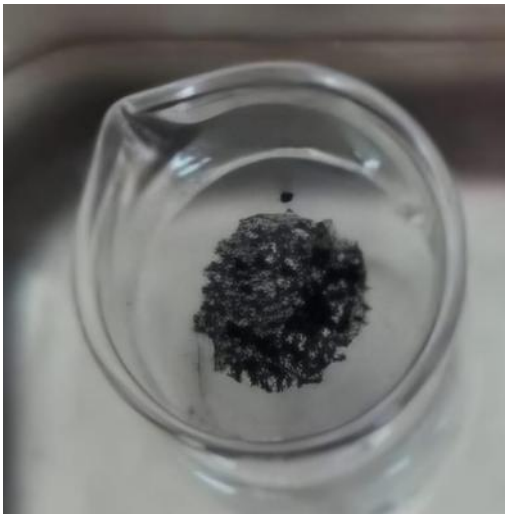
Fonte: Autor.

Esses picos são característicos de materiais à base de grafite e confirmam a presença de uma estrutura cristalina hexagonal bem ordenada, típica dos nanotubos de carbono multicamadas (MWCNTs). A presença do pico intenso em 26° (plano 002) indica a predominância das camadas grafíticas empilhadas, demonstrando um elevado grau de cristalinidade do material.

4.2 Estudo da solução

No primeiro teste, Figura 13, utilizou-se CNT funcionalizado disperso em água deionizada. Observou-se que o material não apresentou uma dispersão homogênea, ocorrendo intensa aglomeração das partículas e decantação após curto período de repouso, indicando baixa compatibilidade entre o CNT funcionalizado e a água deionizada.

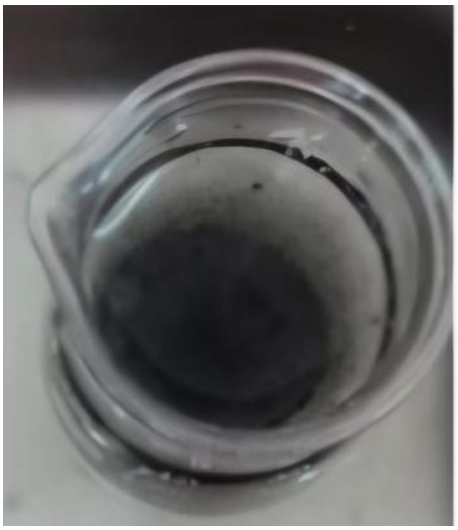
Figura 13: CNT funcionalizado em água deionizada.



Fonte: Autor.

Em seguida, Figura 14, o mesmo procedimento foi repetido empregando CNT não funcionalizado em água deionizada. Nesta condição, foi verificada uma melhora discreta na dispersão, com menor formação de aglomerados, mas ainda sem alcançar a uniformidade desejada.

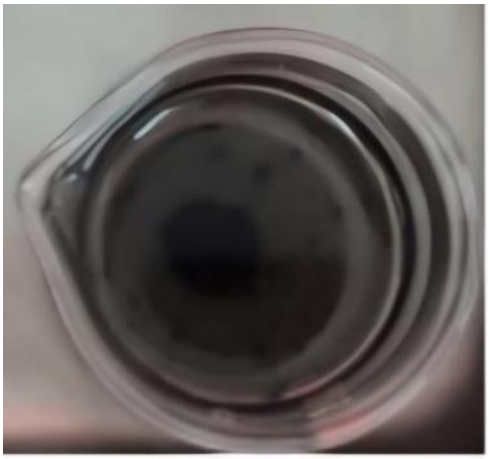
Figura 14: CNT não funcionalizado em água deionizada.



Fonte: Autor.

Na terceira etapa, Figura 15, o solvente foi substituído por acetona, inicialmente com CNT funcionalizado. A utilização da acetona resultou em uma dispersão mais eficiente em comparação ao meio aquoso, devido à maior compatibilidade entre o solvente orgânico e as superfícies modificadas dos nanotubos. Entretanto, ainda foram observadas regiões de aglomeração, o que comprometeu parcialmente a estabilidade da suspensão.

Figura 15: CNT funcionalizado em acetona.



Fonte: Autor.

Finalmente, foi realizado o teste com CNT não funcionalizado em acetona, Figura 16 que apresentou os melhores resultados de dispersão dentre todas as combinações avaliadas. A suspensão obtida mostrou-se visualmente mais uniforme e estável, com distribuição mais homogênea das partículas no meio líquido. Essa configuração foi, portanto, selecionada para os experimentos de deposição eletroforética que exige suspensões estáveis para que o filme seja uniforme (Franco, 2009).

Figura 16: CNT não funcionalizado em acetona.



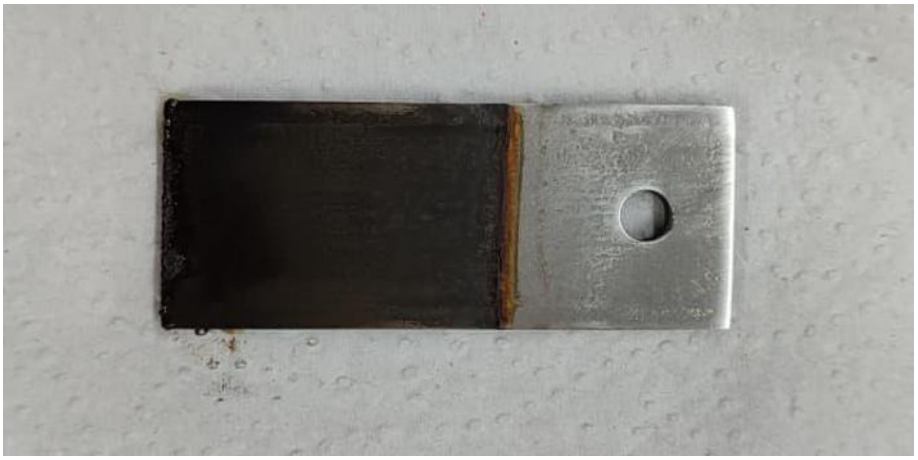
Fonte: Autor.

Para aprimorar a condutividade elétrica da solução e facilitar o transporte de cargas durante o processo de deposição, adicionou-se 0,415 g de iodeto de potássio (KI) à suspensão fina.

4.3 Resultados da deposição

Foram realizadas as deposições em 2 corpos de prova limpos e sem a presença de sujidades (óleo e corrosão), obtendo assim a película do CNT nos corpos de prova (Figura 17).

Figura 17: Corpo de prova com a deposição do CNT.



Fonte: Autor.

Durante o processo de deposição foram utilizados 30 V de tensão e corrente contínua com duração de 3 min, tendo a leitura na fonte da amperagem de 0,8 inicial e 0,64 final, com a solução apresentando levemente a presença de bolhas e sem muita agitação.

Os testes realizados com corpos de prova que apresentavam condições inadequadas, como corrosão (Figura 18) e entranhamento de óleo nos grãos e fissuras (Figura 19), demonstraram que essas contaminações superficiais e internas comprometem a adesão e a eficácia da película protetora.

Assim, constatou-se que, quando o material já se encontra contaminado, a película não consegue aderir corretamente nem garantir a proteção esperada.

Figura 18: Corpo de prova com corrosão.



Fonte: Autor.

Nos 4 corpos de prova com a presença de corrosão houve um início de formação da película, porém ela não apresenta uniformidade e nem aderência na superfície tendo a amperagem inicial de 0,90 e final de 0,74.

Figura 19: Corpo de prova com óleo.



Fonte: Autor.

Nos 4 corpos de prova onde há a presença do óleo a película não consegue aderência no material, durante o processo de deposição o óleo presente nas microfissuras do corpo de prova se liga com os CNTs não os permitindo se juntar e formar a película.

A baixa aderência observada na película de CNT está de acordo com Franco (2009), que destaca que a EPD pode formar depósitos frágeis quando não há interação físico-química adequada entre o material e o substrato.

Durante o processo de deposição com a tensão de 30 V foi analisada a amperagem de 1,06 inicial e 0,84 final para o corpo de prova de cima e 0,68 inicial e 0,50 final para o corpo de prova de baixo.

4.4 Caracterização pós deposição

Utilizando o microscópio FORTEL com uma aproximação de 20x foi possível obter uma imagem da deposição do CNT no corpo de prova como mostrado na Figura 20.

Figura 20: Filme de CNT.



Fonte: Autor.

De acordo com a norma ASTM D3359, realizou-se o ensaio de aderência da película de CNT, conforme apresentado na Figura 21, permitindo avaliar a resistência da deposição.

Figura 21: Ensaio de aderência.



Fonte: Autor.

A aderência do filme de CNT ao substrato mostrou-se insuficiente. Durante a realização do ensaio ASTM D3359 (Método B), grande parte do revestimento se desprendeu, permanecendo aderida à fita utilizada no teste. Como consequência, áreas significativas do corpo de prova ficaram expostas, evidenciando a superfície do aço SAE 1020. Esses resultados indicam que o filme não apresentou fixação adequada ao substrato, revelando baixa resistência à remoção mecânica.

No estudo desenvolvido pela Segat (2024), o material utilizado foi óxido de grafeno (OG) disperso em meio aquoso, o que favorece elevada estabilidade da suspensão devido à presença de grupos oxigenados capazes de manter carga superficial efetiva. Além disso, a pesquisa empregou não apenas a EPD clássica, mas também uma versão modificada utilizando impulsos bipolares de alta tensão, técnica que aprimora a mobilidade eletroforética das partículas, reduz efeitos adversos como eletrólise da água e promove deposições mais densas e aderentes. Como consequência, os filmes formados sobre o substrato de cobre apresentaram boa uniformidade e, principalmente, aderência satisfatória, permitindo o avanço em aplicações funcionais.

Por outro lado, o presente trabalho empregou a deposição de nanotubos de carbono (CNTs) não funcionalizados utilizando suspensão em acetona acrescida de KI, submetida a ultrassom. Embora a técnica de EPD também tenha produzido películas homogêneas, a ausência de grupos funcionais nos CNTs e a menor afinidade química com o aço SAE 1020 comprometeram a interação entre filme e

substrato. Além disso, por ter sido utilizada apenas a configuração convencional da EPD, sem modulação por pulsos ou otimizações adicionais, diferente do estudo da Segat, o processo não foi capaz de gerar ancoragem mecânica ou química suficiente para garantir aderência ao aço, resultando em filmes facilmente destacáveis.

Assim, a comparação evidencia que, embora a EPD seja uma técnica versátil e eficaz, sua aplicabilidade depende fortemente da combinação material, substrato e das condições de deposição. Enquanto o OG apresenta natureza química favorável à ligação com superfícies metálicas e se beneficia de impulsos elétricos modulados, os CNTs não funcionalizados apresentam menor reatividade e exigem tratamentos adicionais, como funcionalização química, ativação superficial do aço ou variações na forma de aplicação do campo elétrico, para alcançar aderência satisfatória. Dessa forma, os resultados reafirmam que a escolha adequada dos parâmetros e do tipo de material é decisiva para o desempenho final de revestimentos obtidos por EPD, especialmente quando destinados à proteção de aços de baixa liga.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu avaliar a viabilidade da deposição eletroforética (EPD) na formação de películas de nanotubos de carbono (CNTs) sobre aço SAE 1020, revelando resultados extremamente relevantes para a compreensão das limitações e potencialidades da técnica. A análise das suspensões confirmou que a combinação acetona, CNT não funcionalizado e do KI, submetida ao ultrassom, foi a que apresentou melhor estabilidade e distribuição das partículas, resultando em uma película visualmente homogênea após a deposição.

Entretanto, apesar da elevada qualidade da suspensão e da aparente uniformidade do filme depositado, constatou-se a inexistência de aderência efetiva da película ao substrato de aço SAE 1020, inclusive nas amostras previamente limpas e isentas de quaisquer contaminantes. A ausência de vinculação entre o revestimento e o metal tornou-se evidente durante a manipulação das amostras e nas etapas de avaliação pós-deposição, revelando que, embora os parâmetros empregados tenham sido adequados para a formação do filme, mostraram-se insuficientes para garantir ancoragem mecânica ou estabelecer interação físico-química consistente com a superfície metálica.

Esse comportamento foi ainda mais crítico nas amostras contendo óleo ou corrosão, que impediram completamente qualquer vestígio de interação entre a película e o substrato. Assim, embora a EPD

tenha se mostrado eficiente na formação da camada de CNTs, o processo, na configuração aplicada, não foi capaz de garantir aderência ao aço SAE 1020, o que compromete a função protetora proposta.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Recomenda-se que estudos futuros explorem modificações químicas no CNT, tratamentos de ativação do aço e diferentes tensões ou tempos de deposição, além de testes em ambientes corrosivos reais.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. D. Estudo da corrosão no aço carbono 1020 protegido com óleo de coco saponificado: análise físico-química do comportamento químico do tensoativo. 2010. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test — ASTM D3359. West Conshohocken, PA, 2017.

CENTRAL MULTIUSUÁRIO DF. Difratometria de Raios X (DRX). Disponível em: https://sites.google.com/view/central-multiusurio-df/solicita%C3%A7%C3%A3o-de-an%C3%A1lises/difratometria-de-raios-x-drx. Acesso em: 23 set. 2025.

CHANG, K. C. et al. Efeitos sinérgicos da hidrofobicidade e das propriedades de barreira a gases na propriedade anticorrosiva de revestimentos nanocompósitos de PMMA incorporados com nanofolhas de grafeno. Polymer Chemistry, v. 5, p. 1049–1056, 2014.

FRANCO, J. R. Deposição eletroforética de nanotubos de carbono. Viçosa, 2009. Disponível em: https://www.posfisicaaplicada.ufv.br/wp-content/uploads/2014/01/2009-Dissertacao-02-Juliana.pdf. Acesso em: 7 maio 2025.

GITHINJI, D. N. Application of advanced techniques for metal identification and characterization. Advances in Physics Theories and Applications, v. 47, p. 73–80, 2016.

GOBBO, L. A. Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland. 2009. 273 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, Instituto de Geociência, São Paulo, 2009.

GOMES, J. F. O microscópio ótico. Revista da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, v. 1, n. 1, p. 55–63, 2005. Disponível em: https://www.fc.up.pt/pessoas/jfgomes/pdf/vol_1_num_1_05_art_microscopioOtico.pdf. Acesso em: 5 dez. 2025.

HERBST, M. H.; MACÊDO, M. I. F.; ROCCO, A. M. Tecnologia dos nanotubos de carbono: tendências e perspectivas de uma área multidisciplinar. Química Nova, v. 27, p. 986–992, 2004.

JIAN, M. Q. et al. Challenge and opportunities of carbon nanotubes. In: Industrial applications of carbon nanotubes. Amsterdam: Elsevier, 2017. p. 433–476. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323414814000150. Acesso em: 7 maio 2025.

KINTEK Solution. FORNO CVD para o crescimento de nanotubos de carbono. 2023. Disponível em: https://pt.kindle-tech.com/articles/cvd-furnace-for-the-growth-of-carbon-nanotubes. Acesso em: 27 nov. 2025.

KINTEK Solution. Vantagens e Desvantagens da Deposição Química de Vapor (CVD). 2024. Disponível em: https://pt.kindle-tech.com/articles/advantages-and-disadvantages-of-chemical-vapor-deposition-cvd. Acesso em: 28 nov. 2025.

MACHADO, A. da S.; MEXIAS, A. S; VILELA, A. C. F.; OSÓRIO, E. Quantificação por DRX dos componentes carbonosos presentes no pó de balão do alto-forno. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 8, n. 4, p. 254–260, 2011. DOI: 10.4322/tmm.2011.040. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/217289/000819189.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 27 nov. 2025.

OLIVEIRA, J. A. M.; DANTAS, D. L.; DE SANTANA, R. A. C. et al. Aspectos teóricos da deposição eletroforética de revestimentos de quitosana. Educação, Ciência e Saúde, Cuité, PB, v. 7, n. 2, p. 19, 2020. DOI: 10.20438/ecs.v7i2.286.

OSSILA. Dip Coating: Practical Guide to Theory and Troubleshooting. 2025. Disponível em: https://www-ossila-com.translate.goog/pages/dip-coating?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc. Acesso em: 28 nov. 2025.

PAINEL CONSTRU. Aço 1020. Disponível em: https://www.painelconstru.com.br/product/detail/1605. Acesso em: 17 nov. 2025.

RODRIGUES, F. A. dos S. Incorporação de nanotubos de carbono em superfície de ligas de alumínio A6101 trefilado. 2015. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

SANTOS, T. F. A. et al. Caracterização microestrutural de aços baixo carbono por microscopia de força atômica. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, v. 35, n. 1, p. 118–133, jun. 2015.

SCIENCEDIRECT. Electrophoretic deposition. In: Topics — Materials Science. [S.l.]: ScienceDirect, 2022.

SEGAT, B. Deposição de óxido de grafeno em cobre via deposição eletroforética clássica e modificada com impulsos bipolares de alta tensão. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) — Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2024.

SILVA JUNIOR, G. Estudo da influência do processo ECAP (Equal Channel Angular Pressing) nas propriedades mecânicas e características microestruturais do aço SAE 1020. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

SOUZA FILHO, A. G. de; FAGAN, S. B. Funcionalização de nanotubos de carbono. Química Nova, v. 30, p. 1695–1703, 2007.

SYDUZZAMAN, M. et al. Carbon nanotubes: Structure, properties and applications in the aerospace industry. Results in Materials, v. 25, p. 100654, 2025.

WATERS, B. W.; TATUM, J. M.; HUNG, Y. C. Effect of chlorine-based sanitizers properties on corrosion of metals commonly found in food processing environment. Journal of Food Engineering, v. 121, p. 159–165, jan. 2014.

XAVIER, Chubraider. Instituto de Química – Câmpus de Araraquara. Disponível em: https://www.iq.unesp.br/#!/lacaque/difracao-de-raios-x/apresentacao/. Acesso em: 23 set. 2025.

ZICA, A. S. Electrochemical exfoliation, electrophoretic deposition and characterization of graphite oxide nanosheets. 2013. 50 f. Dissertação (Mestrado em Física Teórica e Computacional; Preparação e Caracterização de Materiais; Sensores e Dispositivos) – Universidade Federal de Viçosa, 2013.

Capítulo 5

10.37423/260911341

TRITURAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS OFFSHORE: DESAFIOS PARA A RECICLAGEM E A SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS

Isabela Fernandes de Oliveira — *Universidade Federal do Rio de Janeiro*

Laís Bubach Carvalho Simão — *Universidade Federal do Rio de Janeiro*

Beatriz Bandeira dos Santos — *Universidade Federal do Rio de Janeiro*

Fernanda Rodrigues Lago — *Universidade Federal do Rio de Janeiro*

Ana Tereza Marques Parente — *Universidade Federal do Rio de Janeiro*

Marcelo Igor Lourenço de Souza — *Universidade Federal do Rio de Janeiro*

RESUMO

O descomissionamento de estruturas submarinas da indústria de petróleo e gás representa um desafio técnico, ambiental e ocupacional relevante no Brasil, especialmente quanto à gestão dos resíduos gerados. Nesse âmbito, os dutos flexíveis destacam-se pela complexidade de sua composição, que combina camadas metálicas e poliméricas, exigindo métodos específicos de desmonte. Este estudo analisou o processo de trituração desses dutos, considerando seus aspectos técnicos, regulatórios e de saúde e segurança do trabalhador. A partir de observações diretas, foi elaborado um fluxograma do processo e uma análise SWOT para identificar forças, fraquezas, oportunidades e ameaças. Os resultados indicam que a trituração é um processo mecanizado e replicável, com potencial para ampliar a reciclagem de materiais metálicos, embora apresente limitações na recuperação de polímeros e riscos ocupacionais associados à operação dos equipamentos. A adoção de inovações tecnológicas e de práticas ergonômicas podem mitigar esses riscos e ampliar a eficiência operacional. Além disso, propõe-se a incorporação dos princípios da Economia da Funcionalidade e da Cooperação (EFC) como estratégia para fortalecer a sustentabilidade e a valorização do trabalho nos processos de reciclagem, contribuindo para um modelo mais seguro, justo e alinhado aos objetivos de desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Descomissionamento offshore, Dutos flexíveis, Reciclagem, Trituração, Saúde e segurança do trabalhador.

1 INTRODUÇÃO

O petróleo e o gás natural figuram entre as principais fontes de energia que impulsionam a economia mundial e sua indústria produtora está presente ao redor do mundo. No Brasil, estão presentes mais de 120 plataformas em produção offshore (ANP, 2021). Essa infraestrutura está envelhecendo no mundo (DOYLE et al., 2008) e, particularmente, no Brasil existem 72 processos em trâmite para descomissionamentos de plataformas offshore (ANP,2025). Esse envelhecimento tem sido motivo para uma preocupação global com o fim de vida dessas estruturas e a iminência de uma grande quantidade de iniciativas de descomissionamento, o que implica em custos imprevisíveis, altos riscos operacionais, impactos sociais e ambientais (SOARES et al., 2023; FOWLER et al., 2014; MARTINS et al., 2020).

O descomissionamento envolve todos os processos constituintes da desativação de uma instalação, incluindo a desconstrução ou o desmonte dos componentes dessa estrutura e o direcionamento desses componentes para reuso, reciclagem ou destinação final (FAM et al., 2018). No Brasil o descomissionamento é regido pela Resolução da Agência Nacional de Petróleo (ANP) nº 817, de 24 de abril de 2020 (ANP, 2020), que exige a remoção total das estruturas – exceto em regime de exceção, quando análises justifiquem a permanência in situ parcial ou total.

O processo de descomissionamento de instalações de produção offshore de petróleo e gás é complexo e gera custos elevados, atraindo interesse e espaço na literatura recente (CAPOBIANCO et al., 2021). Dentre as estruturas que compõem um sistema offshore de produção, os equipamentos submarinos requerem atenção especial devido à sua natureza sensível e aos desafios logísticos associados ao seu processo de descomissionamento (MARTINS et al., 2020).

O descomissionamento de estruturas submarinas apresenta alto potencial de geração de resíduos e materiais. Em um contexto em que a indústria de Óleo & Gás (O&G) enfrenta pressões crescentes para adotar práticas mais sustentáveis na gestão do fim de vida útil das suas estruturas operacionais offshore (SENAVIRATHNA; GALAPPATHTHI; RANJAN, 2022), iniciativas de reuso e reciclagem das instalações contribuem para a adoção de um novo paradigma alinhado aos princípios da economia circular, que emerge como uma alternativa ao insustentável modelo econômico linear pautado na tríade extrair-produzir-descartar (em inglês, take-make-waste) e gera benefícios ambientais para diversos setores industriais ao promover o retorno de materiais às cadeias de valor como matéria prima secundária através de fluxos reversos (SOUZA & ANGELO, 2021).

Algumas das principais estruturas listadas nos Projetos de Descomissionamento de Instalações (PDIs) disponíveis no site da ANP são dutos rígidos, dutos flexíveis, manifolds e umbilicais (ANP, 2020). Os dutos rígidos e os manifolds são compostos majoritariamente por aço e como este é um material infinitamente reciclável e o mais reciclado do mundo, já está incorporado no core-business das indústrias siderúrgicas a utilização da sucata metálica como matéria prima secundária e a sucata de aço proveniente do descomissionamento de equipamentos do setor de O&G pode constituir uma importante fonte de oferta deste resíduo no país (OLIVEIRA et al., 2024).

Os dutos flexíveis apresentam uma estrutura mais complexa, resultante da utilização de diversos materiais em sua composição. Essa estrutura constitui um produto que não é facilmente desconstruído ou reciclado, necessitando do desenvolvimento de métodos de desmantelamento seguros, ecológicos e econômicos (ZHANG et al., 2023).

Dessa maneira, embora os dutos flexíveis sejam compostos majoritariamente por aço, a presença das camadas helicoidais metálicas intercaladas com camadas poliméricas (TANG, 2023) exige que os materiais que compõem o duto sejam separados antes que possam ser reciclados. Atualmente duas rotas tecnológicas diferentes são utilizadas para essa separação: a trituração dos dutos utilizando-se equipamentos do tipo shredder e o desmantelamento manual dos dutos.

Esse trabalho tem como objetivo apresentar a trituração das linhas flexíveis no Brasil, discutindo suas principais vulnerabilidades e potencialidades considerando-se aspectos de saúde e segurança operacional, assim como aspectos técnicos do processo e aspectos regulatórios.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Cenário brasileiro

Os resíduos gerados após o descomissionamento dos sistemas submarinos de produção de petróleo offshore são considerados resíduos sólidos, cuja gestão é regida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), com exceção dos rejeitos radioativos. A PNRS é o principal marco legal que rege a reciclagem no Brasil, estabelecendo princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos gerados no contexto urbano e industrial, nas etapas de pré e pós consumo.

A aplicação da PNRS sobre o descomissionamento offshore deve ser harmonizada, ainda, com os objetivos da Política Nacional do Meio Ambiente (Lei 6.938/1981), da Política Marítima Nacional (Decreto 12.481/2025), da Política Nacional sobre os Recursos do Mar (Decreto 5.377/2005) e da Lei do Plano de Gerenciamento Costeiro (7.661/1988), visto que o descomissionamento de estruturas marítimas, ao final de seu ciclo de vida, é previsto na Política Marítima Nacional (Decreto 12.481/2025) como uma das diretrizes voltadas à conservação e ao uso sustentável da biodiversidade e dos ecossistemas marinhos, costeiros e fluviolacustres. Destaca-se ainda que todas as atividades laborais do processo, desde a retirada das estruturas do leito marinho até sua reciclagem, devem seguir as prescrições previstas nas Normas Regulamentadoras do Ministério do Trabalho e Emprego pertinentes (BRASIL, [s.d. b]).

Nesse contexto, a Política estabelece como orientação estratégica o incentivo ao descomissionamento dessas estruturas, assegurando sua destinação final de forma ambientalmente adequada, em consonância com os princípios da reciclagem verde e da prevenção da poluição hídrica. Para que seja viável a reciclagem dos dutos flexíveis é necessário executar uma etapa de pré-tratamento, que consiste no desmonte dos dutos, de maneira a possibilitar a separação dos materiais que compõem essa estrutura complexa. Atualmente duas rotas tecnológicas diferentes são utilizadas para essa separação prévia: a trituração dos dutos utilizando-se equipamentos do tipo shredder e o desmantelamento manual dos dutos.

2.2 Composição das Linhas Flexíveis e os Desafios de sua Reciclagem

No cenário nacional, desde o início da exploração de petróleo e gás em águas profundas, os dutos flexíveis foram considerados a opção mais adequada para o transporte de fluidos provenientes das instalações offshore. Tais dutos apresentam vantagens significativas em relação aos dutos rígidos, não apenas pela maior facilidade de manuseio, mas também pela eficiência nos processos de transporte, instalação e operação (MARINHO, 2007).

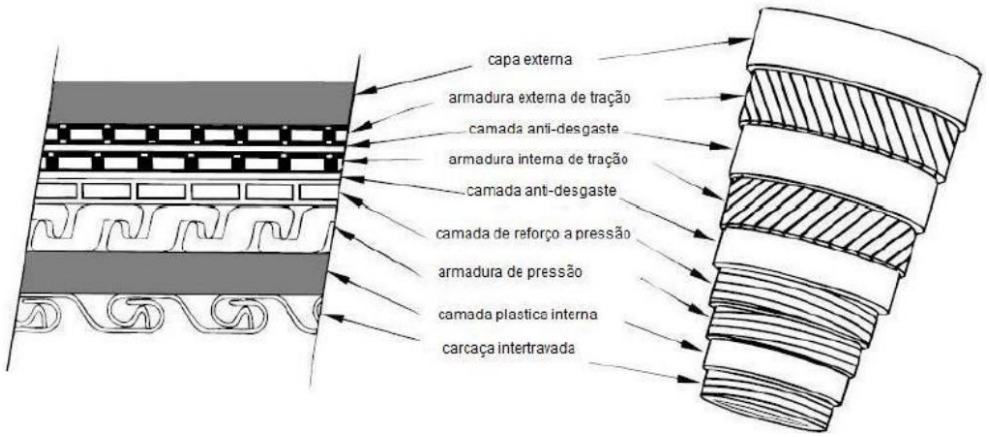
Como consequência, a indústria brasileira de O&G é marcada pelo uso extensivo de dutos flexíveis e umbilicais submarinos, cujos comprimentos totais podem ultrapassar 300 km em um único projeto de descomissionamento (FGV, 2021), e cujo descomissionamento se configura como um desafio particular ao país. O Centro para Descomissionamento da Austrália (CODA) estima que aproximadamente 5.695 quilotoneladas de infraestrutura offshore precisarão ser removidas das áreas offshore da Austrália,

porém, essa estrutura é composta majoritariamente por dutos rígidos (CODA 2022). O relatório de descomissionamento da OEUK (Offshore Energies UK) de 2024, por sua vez, aponta um total de 68,3km de linhas descomissionadas em 2023 e cerca de 326km em 2024. Os dados evidenciam a magnitude do cenário brasileiro em comparação a outras regiões no que se refere a utilização e quantidade de dutos flexíveis descomissionados, os quais serão, em etapa posterior, desmanchados para fins de reciclagem.

Por tal motivo, ressalta-se que o conhecimento aprofundado das camadas estruturais e dos materiais constituintes desses dutos é importante, pois tais aspectos condicionam as estratégias de corte, separação e tratamento durante o desmanche das linhas para a recuperação mais eficiente dos materiais. Os dutos flexíveis são amplamente utilizados nas operações de produção e transporte de óleo e gás no ambiente offshore, sendo compostos por múltiplas camadas de materiais metálicos e poliméricos, cuja combinação assegura o desempenho global requerido para tais aplicações (API, 2002).

As camadas metálicas, incluindo a carcaça, a armadura de pressão e as armaduras de tração, fornecem a resistência necessária para suportar os esforços externos. As camadas poliméricas garantem a vedação do sistema, enquanto as fitas antidesgaste minimizam o atrito entre os componentes metálicos. O número de camadas em dutos flexíveis varia conforme os requisitos operacionais (YE, 2025). Sendo assim, a versatilidade desses dutos se dá pela sua própria constituição em camadas (DAULT, 2024). A Figura 1 ilustra os detalhes de cada camada

Figura 1. Camadas típicas das paredes de um duto flexível



Fonte: Dault (2025)

A carcaça interna, armadura de pressão e tração são camadas metálicas de aço carbono e/ou inox, sendo facilmente absorvidas pela indústria siderúrgica como matéria-prima secundária. Por outro lado, a camada plástica interna ou barreira de pressão, as camadas antidesgaste, fita de alta resistência e capa externa são compostas de materiais poliméricos, como poliamida (PA), fluoreto de polivinilideno (PVDF), polietileno de alta densidade (PEAD) e aramidas (NIELSEN, 2008). Tais polímeros possuem potencial de serem reciclados e reinseridos na cadeia produtiva com novas utilizações.

DIAS et al (2025) apontam que, de modo geral, embora envelhecidos devido ao tempo operacional, os polímeros provenientes de linhas flexíveis descomissionadas mantém a capacidade de suportar carregamentos mecânicos e térmicos, bem como resistência às ações químicas. Módulos de perda e armazenamento de misturas de PVDF reciclado (resíduos de processamento) com PVDF novo permanecem adequados após envelhecimento térmico, demonstrando viabilidade para reaproveitamento (CIRILO, 2017).

Apesar disso, a reciclagem e a reutilização de polímeros de engenharia configuram um processo complexo. O mercado desses materiais reciclados permanece restrito, tanto devido a seus elevados custos quanto das rigorosas exigências de desempenho, que frequentemente conduzem os fabricantes à preferência pelo uso de materiais virgens, sobretudo por razões de segurança (DIAS et al, 2025). Nesse contexto, o desenvolvimento de técnicas, tecnologias e melhores práticas de separação desses materiais provenientes de linhas flexíveis descomissionadas na indústria de O&G é uma demanda importante , mas ainda em evolução.

3 MÉTODO

Este artigo aborda a trituração de dutos flexíveis provenientes do descomissionamento de estruturas submarinas da indústria de O&G , que constitui um processo particular no âmbito das atividades de reciclagem. A natureza exclusiva do processo, combinada com a lacuna identificada na literatura em relação ao estudo das etapas em terra de projetos de descomissionamento (Santos et al., 2024), motivou o desenvolvimento deste trabalho na forma de um estudo de caso (Yin, 2005).

O estudo de caso é um método de observação da realidade social que faz uso de diversas técnicas de investigação social, como entrevistas, observação participante, revisão de documentos e coleta de histórias de vida (Godoy, 2005). Consiste em uma estratégia de pesquisa que permite explorar um

fenômeno dentro de seu contexto real, apoiando-se em múltiplas fontes de evidência para aumentar a robustez dos resultados (Yin, 2005).

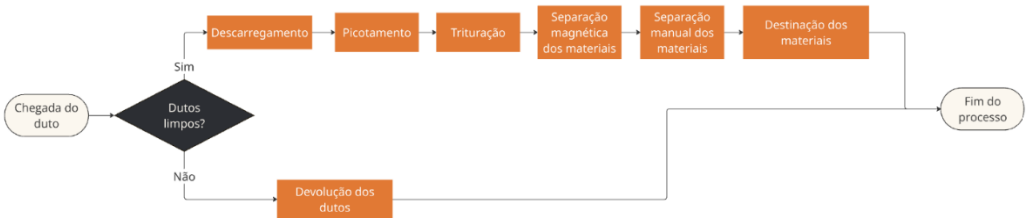
A coleta de dados foi realizada por meio de observações diretas, com o objetivo de garantir a robustez dos dados do estudo de caso. Essa abordagem permitiu reunir informações focadas e direcionadas sobre os temas da pesquisa, além de registrar eventos em tempo real, essenciais para a identificação de riscos à saúde e segurança dos trabalhadores. Os dados coletados foram registrados em diários de campo pelos autores, incluindo descrições dos serviços realizados pelo grupo. Esses dados foram utilizados para construir um modelo do processo observado, consistindo em uma representação abstrata da realidade observada, apresentada por meio de um fluxograma, com o objetivo principal de facilitar a compreensão de um processo (Baldam et al., 2014). Os dados coletados também foram utilizados para gerar uma descrição detalhada das atividades, possibilitando a compreensão do trabalho a partir dos conceitos da Análise Ergonômica do Trabalho (Wisner, 1987; Guérin et al., 2001).

A análise dos dados coletados foi apoiada pela aplicação de uma Matriz SWOT, que consiste em uma ferramenta de planeamento estratégico que analisa um negócio através de quatro elementos: Forças (Strengths), Fraquezas (Weaknesses), Oportunidades (Opportunities) e Ameaças (Threats). As Forças e Fraquezas são fatores internos controláveis, enquanto as Oportunidades e Ameaças são fatores externos sobre os quais a empresa não tem controle (Chiavenato, 2004). Dessa maneira, os aspectos internos analisados pela Matriz SWOT foram resultado dos dados primários coletados, enquanto os aspectos externos foram avaliados a partir de revisão documental de literatura científica, relatórios técnicos e regulamentações pertinentes.

4 RESULTADOS

As principais etapas do processo de trituração de dutos flexíveis podem ser observadas na Figura 2, que são: Recebimento e preparação dos dutos flexíveis (etapa 1); Trituração (etapa 2); Separação do aço carbono, aço inox e polímeros (etapa 3); Separação manual dos polímeros (etapa 4); Moagem dos polímeros (etapa 5) e Pirólise (etapa 6). A figura 2 demonstra o fluxograma do processo.

Figura 2. Fluxograma do processo de trituração de flexíveis

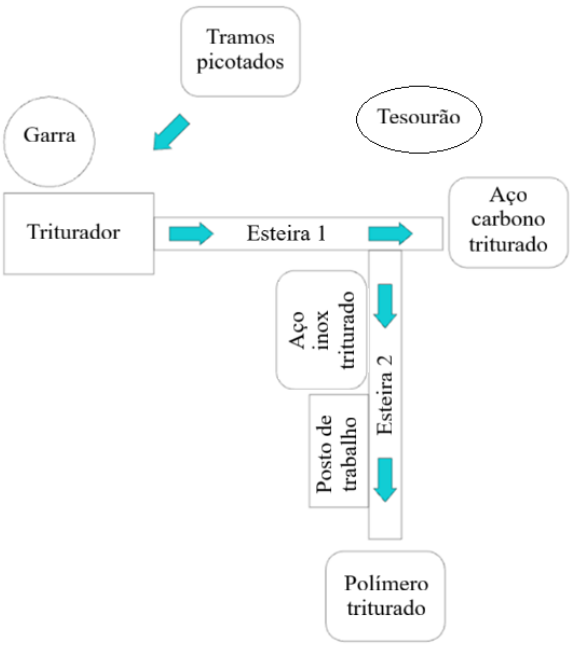


Fonte: Os autores (2025)

Para desenvolvimento dos processos, os equipamentos utilizados incluíram triturador, garras, pá-carregadeira e tesourão. A capacidade diária de trituração é de aproximadamente 100 Ton/dia, operando em horário comercial. Na primeira etapa do processo, os tramos de dutos flexíveis, com comprimentos aproximados de 6 metros, são recebidos por via terrestre e descarregados em um pátio pavimentado e impermeabilizado, dotado de um sistema de contenção e captação de óleo. Posteriormente, os dutos são seccionados em fragmentos menores por meio de uma tesoura hidráulica industrial, acoplada em uma retroescavadeira. Componentes metálicos, como conexões e outros acessórios eventualmente acoplados aos dutos, são removidos antes da trituração e destinados diretamente à reciclagem siderúrgica.

Os fragmentos picotados são então introduzidos no equipamento de trituração com o auxílio de pás carregadeiras, iniciando o processo de trituração propriamente dito. No interior do equipamento, o material é submetido ao impacto de oito martelos e, em seguida, classificado granulometricamente por uma grade de peneiramento. O fluxo de alimentação é coordenado pelo operador da sala de comando, que sinaliza a disponibilidade do equipamento para o recebimento de um novo lote de material. A Figura 3 apresenta o layout da área de processamento, juntamente com a representação esquemática do fluxo de material.

Figura 3. Fluxo do material no triturador e nas esteiras de separação



Fonte: Os autores (2025)

A terceira etapa do processo consiste na separação das frações de aço carbono, aço inoxidável e polímeros. Inicialmente, o material processado é transportado pela Esteira 1, onde um sistema de separação magnética remove o aço carbono, que é então direcionado para um ponto de coleta específico. O material remanescente, uma mistura de aço inoxidável e polímeros, prossegue para a Esteira 2. Nesta segunda esteira, operadores realizam a segregação manual do aço inoxidável, depositando-o em uma caçamba designada, conforme layout da Figura 3. O fluxo de material restante, agora composto exclusivamente por polímeros, continua até o final da Esteira 2, onde é coletado.

As frações de aço carbono e aço inoxidável, segregadas por via magnética e manual, respectivamente, são armazenadas para posterior envio à indústria siderúrgica. A massa de polímeros, por sua vez, é submetida a uma etapa adicional de triagem manual, na qual se seleciona uma parcela para reciclagem mecânica. Este processo recupera aproximadamente 50% da massa total de polímeros contida nos dutos triturados. Uma análise estratégica do processo de trituração, contemplando suas forças, fraquezas, oportunidades e ameaças, é apresentada na Matriz SWOT da Figura 4.

Figura 4. Matriz SWOT aplicada ao processo de trituração

S	W
Previsibilidade de duração das atividades Alta produtividade, chegando a 100t/dia Facilidade de padronização do processo	Trabalho exposto a intempéries Exposição dos trabalhadores a ruído e calor Exposição dos trabalhadores a riscos associados a esforços repetitivos nas atividades de separação de resíduos com auxílio de esteiras rolantes Degradação de parte dos polímeros, impossibilitando sua destinação para a reciclagem
O	**T**
Previsão de grande número de projetos de descomissionamento de estruturas submarinas Potencial de integração dos catadores de materiais recicláveis e reutilizáveis na etapa de separação, em conformidade com a PNRS	Investimento inicial para instalação de uma planta de trituração é alto quando comparado a outros métodos de desmonte de flexíveis Alta variabilidade do preço de polímeros reciclados

Fonte: Os autores (2025)

5 DISCUSSÕES

Uma das principais fraquezas identificadas no processo de trituração é a dificuldade de separar os polímeros e direcioná-los para a reciclagem, levando a um aproveitamento somente parcial dos resíduos resultantes do descomissionamento e reduzindo o desempenho do processo em aspectos ambientais e econômicos. No processo mapeado uma melhoria de processo já havia sido implementada para reduzir essa perda, através da incorporação de uma segunda separação feita depois da passagem do material pelas esteiras do triturador. Essa fraqueza poderia ser mitigada de forma mais extensa e evitando a exposição dos trabalhadores ao esforço repetitivo pela adoção de inovações tecnológicas voltadas para a identificação e separação dos polímeros (BREDÁCS et al., 2025; DE LIMA RIBEIRO, 2024, WERNER et al., 2023).

Outra maneira de mitigar essa fraqueza seria a associação da trituração a uma planta de pirólise para a reciclagem dos polímeros cuja reciclagem mecânica se torne inviável depois da trituração, seja por inviabilidade técnica (impossibilidade de se separar os polímeros ou degradação do polímero por exposição a altas temperaturas durante a trituração) ou econômica.

As demais fraquezas identificadas no processo dizem respeito à exposição dos trabalhadores ao risco. Embora não seja possível eliminar completamente os riscos associados a um processo produtivo, o avançado grau de mecanização do processo facilita a sua padronização e a subsequente tomada de ações de mitigação desses riscos, através da adoção de melhores práticas do mercado para a operação dos equipamentos utilizados e aderência a normas de segurança.

O grau de mecanização do processo é uma consequência direta dos equipamentos utilizados, o que resulta em um investimento inicial para a implementação de uma planta de trituração mais alto do que o de outros métodos de desmonte de flexíveis, representando uma ameaça a esse tipo de processo. Entretanto, é também responsável pelas suas maiores forças: a previsibilidade da duração das atividades e a alta produtividade comprovada, que garantem confiabilidade na capacidade produtiva e na capacidade de processar lotes de material dentro de prazos pré-definidos, e a facilidade de padronização e replicabilidade do processo, que podem contribuir para uma implementação relativamente rápida de novas plantas, facilitando o treinamento de novos trabalhadores e contribuindo para aumentar a quantidade de plantas de trituração existentes no país, cujo pequeno número pode ser percebido por operadoras de petróleo inclinadas a adotarem a trituração como rota de desmonte para seus dutos flexíveis descomissionados como uma ameaça.

A velocidade com que essas novas plantas podem ser implementadas - e a quantidade de novas plantas que vão surgir - são impactadas, entretanto, pela ameaça representada pela flutuação dos preços de polímeros reciclados no mercado. Essa ameaça poderia ser mitigada por políticas de incentivo à reciclagem e pela construção de um ecossistema de cooperação em que as empresas não sintam a necessidade de competir entre si, reduzindo ainda mais suas margens de lucro e ameaçando a viabilidade econômica de seus processos.

Um ecossistema dessa natureza pode ser incentivado através da adoção de um modelo de negócio alinhado com os princípios da Economia da Funcionalidade e da Cooperação (EFC), que oferece um referencial que integra a dimensão do trabalho e o bem-estar social às estratégias de sustentabilidade. A EFC propõe um modelo de negócio focado na construção de Ecossistemas Cooperativos Territoriais, onde o valor é gerado não apenas pela circularidade, mas pelas relações de cooperação e pela valorização da atividade laboral. Ao aplicar esta abordagem aos processos de desmanche de dutos flexíveis, os trabalhadores são reconhecidos como agentes centrais da transformação, promovendo inovação social e soluções resilientes (SILVA et al., 2019).

A emergência da necessidade deste novo modelo evidencia-se na cadeia atual analisada de desmanche de dutos flexíveis, marcada pela intensa competição que resulta em precarização do trabalho e riscos à segurança. Como alternativa, a EFC considera a formação de Ecossistemas Cooperativos Territoriais (GAGLIO; LORIOL; DU TERTRE, 2011), que superam a lógica concorrencial por meio da colaboração entre os atores, do compartilhamento de recursos e da participação ativa dos trabalhadores (LIMA et

al., 2019). Assim, o desmantelamento transcende sua função de fim de ciclo, tornando-se uma oportunidade para a regeneração de valores, o fortalecimento do território e um desenvolvimento social e ambientalmente justo.

O desmanche onshore dos dutos flexíveis e umbilicais configuram uma etapa crítica do processo de descomissionamento de sistemas submarinos de produção de O&G, cujos riscos para a saúde ocupacional e a segurança do trabalhador são pouco compreendidos, em contraste às operações offshore do processo. Independente do processo utilizado para o desmonte, as atividades são por vezes realizadas em condições de trabalho que carecem melhorias e em territórios socialmente vulneráveis e demandam análise mais aprofundada não apenas para garantia de requisitos regulamentares e melhoria das condições de trabalho, mas também para o desenvolvimento socioeconômico dos territórios onde as empresas se instalam.

Para fomentar a criação de postos de trabalho adequados e melhorias operacionais, é necessário adotar uma abordagem centrada na análise do trabalho real, que considera as variabilidades e os determinantes da atividade de trabalho (DANIELLOU & BÉGUIN, 2007). Em conformidade com a legislação brasileira, a metodologia da Análise Ergonômica do Trabalho (AET), prevista na Norma Regulamentadora 17, permite compreender a dinâmica laboral e as estratégias desenvolvidas pelos trabalhadores. (BRASIL, [s.d. a]). A AET preconiza a construção colaborativa de soluções e melhorias, valorizando o saber tácito dos trabalhadores para enfrentar as demandas do ambiente de trabalho. (GUÉRIN et al., 2001). Essa abordagem não só promove um ambiente laboral mais seguro e eficiente, mas também contribui para a redução da incidência de adoecimentos e afastamentos. Dessa forma, a saúde e o bem-estar dos trabalhadores consolidam-se como pilares para a sustentabilidade do processo de desmanche onshore (Béguin, 2006).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O descomissionamento de estruturas submarinas consiste em um processo complexo que apresenta ao mesmo tempo altos custos associados e alto potencial de geração de resíduos e materiais. No cenário nacional, grande parte dos resíduos provenientes do descomissionamento de estruturas submarinas de produção de O&G é composto por dutos flexíveis descomissionados, cuja estrutura interna exige a adoção de um processo de desmonte que possibilite a separação dedas suas camadas.

Atualmente, duas rotas tecnológicas diferentes são utilizadas para essa separação, e este estudo deteve-se em analisar as principais vulnerabilidades e potencialidades do processo de trituração.

O processo de trituração é marcado por um grau relativamente alto de mecanização, que eleva o investimento inicial necessário para a implementação do processo, porém resulta em maior padronização e replicabilidade dos processos, previsibilidade da duração das atividades e alta produtividade. As principais fraquezas do processo referem-se à exposição dos trabalhadores a riscos que, embora não possam ser completamente neutralizados, podem ser mitigados pela adoção de melhores práticas do mercado para a operação dos equipamentos utilizados e aderência a normas de saúde e segurança, e à degradação sofrida pelos polímeros, dificultando a sua separação e subsequente reciclagem. Essa fraqueza, por sua vez, pode ser atenuada pela adoção de melhorias de processo – várias das quais foram observadas no mercado brasileiro.

Merece destaque, entretanto, a ameaça representada pela flutuação dos preços de polímeros reciclados no mercado, agravada pelo caráter fortemente concorrencial competitivo do mercado de reciclagem. A intensa competição identificada resulta em precarização do trabalho e riscos à saúde e segurança do trabalhar, e aponta para o grande potencial da criação de um ambiente cooperativo através da implementação da abordagem da EFC como uma ferramenta frente a principal ameaça identificada no presente estudo.

A construção e a implementação de ecossistemas cooperativos a partir de uma abordagem baseada na EFC, assim como a análise de viabilidade técnica e econômica das soluções propostas para mitigação das fraquezas do processo, consistem em possibilidades de desenvolvimentos de pesquisas futuras, dando continuidade aos achados do presente estudo, cuja principal limitação consistiu na impossibilidade de realizar uma Análise Ergonômica do Trabalho a fim de para mapear riscos reais aos quais os trabalhadores estão expostos, por restrições de tempo e recursos, tendo se limitado a coleta de dados através de observações pontuais.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer à FAPERJ - Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Processo SEI E-26/203.732/2025, à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), cuja gestão das bolsas de mestrado no Programa de Recursos Humanos (PRH-

ANP) é realizada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) – e pela Fundação COPPETEC – Fundação para Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos), e à Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS) que apoiaram técnica e financeiramente os autores na preparação do trabalho.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Painel dinâmico de dados da produção de petróleo e gás natural. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZjFlMWI0MDgtNWNiNC00OTZlLWI3NGQtOGI0Mi1iN2VmLTEyNGFmY2FkYzkxMyJ9 . Acesso em: 29 set. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Resolução ANP nº 817, de 24 de abril de 2020. 2020a. Disponível em: https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-817-2020-dispoe-sobre-o-descomissionamento-de-instalacoes-de-exploracao-e-de-producao-de-petr. Acesso em: 29 set. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP); FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). Descomissionamento offshore no Brasil: oportunidades, desafios e soluções. 2021.

API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended practice for flexible pipe. 2002.

BALDAM, R.; VALLE, R.; ROZENFELD, H. Gerenciamento de processos de negócio – BPM: uma referência para implantação prática. 2014.

BÉGUIN, P. Ergonomia e projeto: contribuições para a epistemologia da atividade. In: DANIELLOU, F. (Org.). A ergonomia em busca de seus princípios. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

BRASIL. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Norma Regulamentadora nº 17: Ergonomia. [S. l.]: [s. n.], [s. d. a]. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-17. Acesso em: 7 out. 2025.

BRASIL. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Normas Regulamentadoras – NR. [S. l.]: [s. n.], [s. d. b]. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/normas-regulamentadoras-nrs. Acesso em: 30 set. 2025.

BREDÁCS, M. et al. Progress towards composition-based inline sorting and recycling of multilayer polymer packaging. Sustainable Materials and Technologies, v. 44, p. e01385, 2025.

CAPOBIANCO, N. et al. Toward a sustainable decommissioning of offshore platforms in the oil and gas industry: a PESTLE analysis. Sustainability (Switzerland), v. 13, n. 11, 2021.

CHIAVENATO, I. Planejamento estratégico. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2004.

CIRILO, M.; COSTA, M. F. Blends of PVDF with its processing waste: study of the mechanical properties of the blends thermally aged. The Minerals, Metals & Materials Series, p. 247–257, 2017.

CODA. Understanding Australia's decommissioning value chain. 2022. Disponível em: https://www.industry.gov.au/publications/australias-offshore-resources-decommissioning-roadmap/understanding-australias-decommissioning-value-chain. Acesso em: 5 out. 2025.

DANIELLOU, F.; BÉGUIN, P. Methodology of ergonomic action: approaches to real work. In: FALZON, P. (Ed.). Ergonomics. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.

DAULT, D.; CAMPOS, L. C. R. Uso de dutos flexíveis e umbilicais na produção de petróleo nos campos do pré-sal. TEC-USU, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 98–143, 2024.

DE LIMA RIBEIRO, A. et al. Multi-sensor characterization for an improved identification of polymers in WEEE recycling. Waste Management, v. 178, p. 239–256, 2024.

DIAS, J. et al. Physical–chemical properties of recycled samples made from discarded parts of polymers used in flexible pipelines. v. 2, n. 1, 31 mar. 2025.

DOYLE, M. W. et al. Environmental science: aging infrastructure and ecosystem restoration. Science, 18 jan. 2008.

FAM, M. L. et al. A review of offshore decommissioning regulations in five countries – strengths and weaknesses. Ocean Engineering, 15 jul. 2018.

FGV ENERGIA. Descomissionamento offshore no Brasil: oportunidades, desafios & soluções. Ano 8, jan. 2021. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br. Acesso em: 5 out. 2025.

FOWLER, A. M. et al. A multi-criteria decision approach to decommissioning of offshore oil and gas infrastructure. Ocean and Coastal Management, v. 87, p. 20–29, 2014.

GAGLIO, G.; LORIOL, J.; DU TERTRE, C. (Orgs.). L'économie de la fonctionnalité: une voie nouvelle vers un développement durable? Paris: Octarès, 2011.

GODOY, A. S. Estudo de caso qualitativo. In: GODOI, C. K.; BANDEIRA DE MELLO, R.; SILVA, A. B. (Orgs.). Pesquisa qualitativa em estudos organizacionais: paradigmas, estratégias e métodos. São Paulo: Saraiva, 2005.

GUÉRIN, F. et al. Compreender o trabalho para transformá-lo: a prática da ergonomia. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

LIMA, F. P. A. et al. Ecossistemas cooperativos de produção e inovação servicial: Economia da Funcionalidade e da Cooperação (EFC) e desenvolvimento territorial. In: SEMINÁRIO SOBRE A ECONOMIA MINEIRA, 18., 2019, Diamantina. Anais... Diamantina: Cedeplar/UFMG, 2019.

MARINHO, M. G. et al. Surface monitoring techniques for a continuous flexible riser integrity assessment. Offshore Technology Conference Proceedings, OTC-18946-PP, 2007.

MARTINS, I. D. et al. Dimensionality reduction for multi-criteria problems: an application to the decommissioning of oil and gas installations. Expert Systems with Applications, v. 148, 15 jun. 2020.

NIELSEN, K. G.; KRISTIANSEN, M.; BENDIKSEN, E. Flow assurance and optimal design of thermal characteristics in flexible pipes. In: Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 2008. OTC 19397.

OLIVEIRA, I. F. et al. GHG emissions avoided by closing the loop in the decommissioning of subsea equipment. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2024.

OFFSHORE DECOMMISSIONING REPORT 2024. The decommissioning outlook for the UK's offshore energy industry. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: https://oeuk.org.uk/wp-content/uploads/2024/11/OEUK-Decommissioning-Report-2024.pdf. Acesso em: 3 out. 2025.

SANTOS, B. B. et al. Segurança do trabalhador e saúde ocupacional no descomissionamento de sistemas de produção de óleo e gás: uma revisão sistemática. Revista Ação Ergonômica, v. 18, n. 2, 2024.

SENAVIRATHNA, G. R. U.; GALAPPATHTHI, U. I. K.; RANJAN, M. T. T. A review of end-life management options for marine structures: state of the art, industrial voids, research gaps and strategies for sustainability. Cleaner Engineering and Technology, v. 8, p. 100489, jun. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100489. Acesso em: 20 mar. 2024.

SILVA, P. S. R. S. et al. Economia da funcionalidade e da cooperação: da produção de alimentos ao bem-estar alimentar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE INOVAÇÃO E GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, 12., 2019, São Paulo. Anais... São Paulo: Blucher, 2019. p. 1308–1320.

SOARES, L. N. et al. Decommissioning of umbilicals and flexible pipes: a sensitivity analysis in decision-making process. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING, 42., 2023, Melbourne, Austrália. Proceedings... New York: ASME, 2023.

SOUZA, D. P.; ANGELO, A. C. M. Avaliação do ciclo de vida do descomissionamento de dutos rígidos de produção de petróleo offshore. In: Congresso Brasileiro de Gestão do Ciclo de Vida, 2021, Online. Contribuições para os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, 2021.

TANG, M. Flexible pipes. In: Pipeline engineering – design, failure, and management. London: IntechOpen, 2023. ISBN 978-1-83768-000-9. Disponível em: https://www.intechopen.com/chapters/85818

WERNER, T.; TAHA, I.; ASCHENBRENNER, D. An overview of polymer identification techniques in recycling plants with focus on current and future challenges. Procedia CIRP, v. 120, p. 1381–1386, 2023.

WISNER, A. Ergonomia ou a ciência do trabalho. São Paulo: Editora Manole, 1987.

YE, W. et al. Finite element study on the wet collapse mechanism of a flexible pipe with eroded carcass. Ocean Engineering, v. 329, p. 121124, 12 abr. 2025.

YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

ZHANG, X. et al. Techno-economic and environmental analysis of decommissioned flowline, umbilical, and tubular for breakwaters. Buildings, v. 13, n. 1, 2023.

Capítulo 6

10.37423/260911346

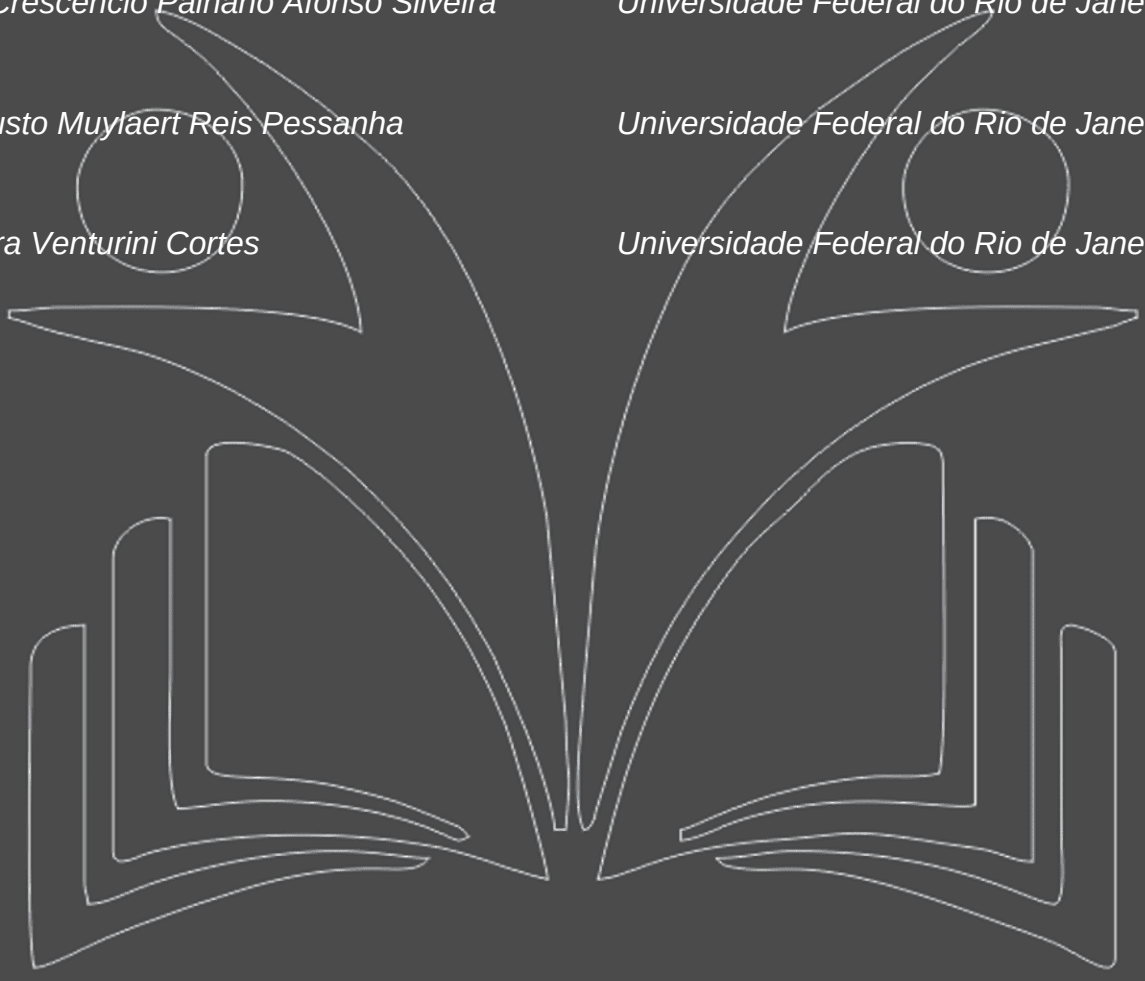
DESCOMISSIONAMENTO OFFSHORE NO SETOR DE ÓLEO E GÁS: DIRETRIZES PARA UM GUIA ESTRUTURADO

Fernanda Rodrigues Lago — *Universidade Federal do Rio de Janeiro*

Laurelena Crescencio Palhano Afonso Silveira — *Universidade Federal do Rio de Janeiro*

Pedro Augusto Muylaert Reis Pessanha — *Universidade Federal do Rio de Janeiro*

Erika Pereira Venturini Cortes — *Universidade Federal do Rio de Janeiro*



RESUMO

As atividades envolvidas no processo de descomissionamento de instalações devem ser conduzidas de forma sistemática, seguindo fases bem definidas. A etapa de planejamento, quando fundamentada em diretrizes estruturadas, é essencial para assegurar a integridade operacional, minimizar impactos ambientais, socioeconômicos, de saúde e segurança dos agentes direta e indiretamente impactados, promover a adequada gestão e destinação de materiais e garantir conformidade com os requisitos regulatórios. No contexto internacional, a existência de guidelines estabelecem boas práticas e diretrizes normativas que abrangem todo o processo de desativação de instalações. No Brasil, as resoluções vigentes funcionam como estruturas regulatórias que, isoladamente, envolvem requisitos mínimos de análise, documentos obrigatórios, aprovações e garantias financeiras, mas carecem de um documento único e padronizado que reúna diretrizes mínimas e consolide as exigências aplicáveis. O objetivo do desse artigo é apresentar um guia preliminar que consolide, de forma clara e concisa, as etapas essenciais do processo de descomissionamento no setor de óleo e gás, envolvendo as definições e proposições dos requisitos mínimos a serem observados em cada etapa. Espera-se que, ao final, este guia possa constituir uma referência prática para os diversos atores envolvidos em qualquer fase do processo.

Palavras-chave: Descomissionamento, Planejamento, Guia.

1 INTRODUÇÃO

As instalações offshore de petróleo e gás têm em média uma vida útil entre 20 e 30 anos. O momento em que elas deixam de ser economicamente e tecnicamente viáveis, representa o início do processo de descomissionamento, ou seja, a última fase do seu ciclo de vida (VIDAL et al., 2022). Em janeiro de 2021, 33% das unidades de produção offshore em operação no Brasil possuíam mais de 25 anos de uso, enquanto 20% apresentavam entre 15 e 25 anos de operação (ANP, 2021). Esses dados indicam que mais de 50% dessas unidades encontram-se em estágio maduro, próximas ou já inseridas em fase de declínio produtivo, o que as torna candidatas potenciais ao descomissionamento em curto e médio prazos (RIBEIRO, 2025).

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) define o descomissionamento como o "conjunto de atividades associadas à interrupção definitiva da operação das instalações, ao abandono permanente e arrasamento de poços, à remoção de instalações, à destinação adequada de materiais, resíduos e rejeitos e à recuperação ambiental da área." (ANP, 2020, p. 2). O processo é complexo e envolve múltiplas partes interessadas, tais como as operadoras de óleo e gás (O&G), prestadores de serviços, governo, grupos ambientais e outros usuários do mar (VIDAL et al., 2022).

Considerando a densidade do processo e a diversidade de atores envolvidos, observa-se, no cenário internacional, a consolidação de documentos técnicos, os chamados guidelines ou notas orientativas, desenvolvidos com o propósito de estabelecer diretrizes para os agentes envolvidos no processo de descomissionamento.

O processo de descomissionamento offshore no Brasil envolve um arranjo institucional desafiador, no qual diferentes atores exercem papéis complementares e interdependentes. As empresas concessionárias e operadoras são as responsáveis diretas pela execução do descomissionamento, cabendo-lhes elaborar e submeter à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) o Plano de Descomissionamento de Instalações (PDI), conforme as diretrizes estabelecidas pela Resolução ANP nº 817/2020 (ANP, 2020). Também lhes compete garantir a integridade e o abandono seguro dos poços, realizar a remoção e a destinação ambientalmente adequada das estruturas e materiais e apresentar as garantias financeiras, previstas na Resolução ANP nº 854/2021, que asseguram os recursos necessários para a execução integral das obrigações (ANP, 2021). A ANP exerce papel central na regulação e fiscalização técnica, aprovando PDIs, administrando as garantias e verificando a conformidade das atividades com os contratos e normas setoriais. O Instituto Brasileiro

do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), conforme suas competências legais, é responsável pelo licenciamento e pela fiscalização ambiental das operações (BRASIL, 2010), enquanto a Marinha do Brasil, por meio da Diretoria de Portos e Costas, atua na garantia da segurança da navegação e na conformidade com as normas NORMAM-07, 08 e 11 (MARINHA DO BRASIL, 2020). A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), por sua vez, supervisiona o gerenciamento e a destinação de rejeitos radioativos oriundos de materiais contaminados com NORM, com base nas normas CNEN-NN 3.01, 5.01, 8.01 e 8.02 (CNEN, 2014).

A coexistência de múltiplas autoridades com competências específicas torna indispensável uma governança interinstitucional coordenada, capaz de assegurar previsibilidade regulatória, evitar sobreposições e promover transparência nos processos decisórios (ARUP, 2017; OGEER, 2022; OEUK, 2023). Essa coordenação deve integrar aspectos técnicos, ambientais, jurídicos e de segurança, garantindo rastreabilidade e proteção do interesse público, como defendido em estudos comparados sobre regimes de descomissionamento conduzidos pela NOPSEMA - National Offshore Petroleum Safety and Environmental Management Authority (2020) e pela Bureau of Ocean Energy Management (BOEM) e Bureau of Safety and Environmental Enforcement (BSEE) (2019). No geral, as resoluções vigentes funcionam como estruturas regulatórias que, isoladamente, envolvem requisitos mínimos de análise, documentos obrigatórios, aprovações e garantias financeiras, mas carecem de um documento único e padronizado que reúna diretrizes mínimas e consolide as exigências aplicáveis.

A contribuição deste artigo é apresentar um framework estruturante para a elaboração de um Guia para Planejamento de Descomissionamento Offshore no Setor de O&G no Brasil, integrando dimensões técnica, ambiental, saúde e segurança, socioeconômica, regulatória, logística e de stakeholders, e alinhando-o a referências internacionais e nacionais. Projeta-se que o guia venha a constituir uma referência procedimental para os diversos agentes envolvidos nas múltiplas fases do descomissionamento offshore no setor de O&G.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O DESCOMISSIONAMENTO NO SETOR DE O&G

Segundo o Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (2024), a indústria de petróleo e gás tem papel estratégico no Brasil e figura entre as principais fontes de energia que impulsionam a economia

mundial e sua indústria produtora está presente ao redor do mundo (FGV, 2021). De acordo com a ANP (2021), em janeiro de 2021, mais de 30% das unidades de produção offshore existentes no Brasil estavam em operação há mais de 25 anos. Esses números refletem a tendência global de envelhecimento da infraestrutura offshore e de crescimento da indústria de descomissionamento como um novo segmento econômico emergente (DOYLE et al., 2008).

No campo científico, observa-se uma lacuna significativa na literatura de engenharia e gestão sobre métodos integrados de planejamento e avaliação de descomissionamento, capazes de abranger as múltiplas dimensões do processo (AHIAGA-DAGBUI et al., 2017; LEITE & BELCHIOR, 2023). As abordagens existentes tendem a ser fragmentadas — concentrando-se em custos, impactos ambientais ou aspectos jurídicos —, mas raramente integram todos esses vetores sob um modelo analítico único.

Em resposta a essa lacuna, organismos multilaterais e governos nacionais têm desenvolvido frameworks orientadores para o encerramento sustentável de operações de O&G. O Toolkit Towards Sustainable Decommissioning and Closure of Oil Fields and Mines (WORLD BANK/COCPO, 2010) representa uma das primeiras tentativas sistemáticas de estruturação desse tipo de guia, ao reunir princípios e instrumentos voltados a governos de países produtores. O documento propõe cinco pilares essenciais, que permeiam desde o arcabouço político, legal e regulatório, até boas práticas ambientais, sociais e de saúde e segurança, garantias financeiras, mecanismos de monitoramento e fiscalização e consulta aos stakeholders.

Essa estrutura foi posteriormente reforçada por iniciativas regionais, como o Oil and Gas Decommissioning Toolkit da Commonwealth Secretariat (OGEER, 2022), que detalha procedimentos operacionais e responsabilidades institucionais. Ambos os documentos destacam a necessidade de antecipar o descomissionamento desde a fase de concepção dos empreendimentos, incorporando o planejamento de encerramento como parte do ciclo de vida do ativo.

Do ponto de vista econômico, a etapa de descomissionamento envolve custos elevados e incertezas financeiras significativas. O relatório de Ahiaga-Dagbui et al. (2017) evidencia a dificuldade de estimar custos de descomissionamento em ambientes offshore complexos, especialmente quando há lacunas de dados, mudanças regulatórias e variações tecnológicas. Essa imprevisibilidade justifica o uso de ferramentas de análise multicritério e planejamento baseado em risco, que permitem avaliar

alternativas sob diferentes dimensões de desempenho técnico, ambiental, econômico e social (ABB Consulting, 2015; WATSON et al., 2023).

Sob a perspectiva ambiental, o descomissionamento requer uma visão ecossistêmica. Estudos recentes destacam que a simples remoção das estruturas pode representar perda de habitats artificiais e afetar serviços ecossistêmicos consolidados ao longo da operação (FORTUNE & PATERSON, 2018). Por isso, decisões sobre remoção total, parcial ou abandono in situ devem considerar aspectos biológicos, hidrodinâmicos e de biodiversidade, além das implicações legais e de segurança da navegação.

Finalmente, sob o ponto de vista institucional e de políticas públicas, a literatura aponta que o descomissionamento é um tema de governança colaborativa (INVERNIZZI et al., 2020; WORLD BANK, 2010). Ele requer articulação entre diferentes órgãos — reguladores, ambientais, trabalhistas, marítimos e fiscais — e o alinhamento de competências entre esferas federais, estaduais e locais.

Em síntese, o descomissionamento offshore deve ser compreendido como uma etapa integrada e planejada do ciclo de vida de produção, e não como um evento terminal. Sua condução requer visão estratégica, previsibilidade financeira, transparência institucional e responsabilidade socioambiental. O desafio contemporâneo, portanto, é transformar o descomissionamento de uma obrigação regulatória em uma oportunidade de inovação, circularidade e geração de valor sustentável para o setor de O&G e para as comunidades costeiras impactadas

2.2 GUIDELINES NO CONTEXTO INTERNACIONAL

A experiência internacional com o descomissionamento offshore demonstra que a consolidação de guidelines claros e aplicáveis é determinante para o sucesso de políticas e práticas de encerramento sustentável de operações de petróleo e gás. Em países com tradição offshore mais antiga, como Reino Unido, Noruega, Estados Unidos e Austrália, a formação de estruturas regulatórias sólidas ocorreu em resposta direta aos desafios técnicos, ambientais e econômicos que emergiram a partir das décadas de 1980 e 1990. Tais estruturas evoluíram para modelos cada vez mais baseados em governança, transparência e previsibilidade regulatória — princípios que hoje sustentam o conceito de descomissionamento sustentável.

O Reino Unido constitui o caso mais consolidado e amplamente documentado. Desde a Petroleum Act (1987) e os regulamentos subsequentes, o país desenvolveu uma base regulatória específica para o

descomissionamento offshore, coordenada inicialmente pelo Department of Energy and Climate Change (DECC, 2011) e atualmente pelo Offshore Petroleum Regulator for Environment and Decommissioning (OPRED), sob o Department for Energy Security and Net Zero.

Complementarmente, o conjunto de publicações da Offshore Energies UK (OEUK), como o Decommissioning Insight (2017) e o Guidance Notes emitido pelo Department For Business, Energy And Industrial Strategy (BEIS) e OPRED (2018), oferece um modelo detalhado de boas práticas industriais. Esses documentos estruturam o processo em etapas que abrangem: (i) planejamento e aprovação; (ii) operações de descomissionamento; e (iii) monitoramento pós-descomissionamento. Entre seus avanços, destacam-se a adoção do princípio de “as low as reasonably practicable” (ALARP), a obrigatoriedade de avaliação comparativa de alternativas (Comparative Assessment) e o uso de indicadores de desempenho ambiental. O enfoque britânico é considerado referência global por equilibrar rigor técnico com flexibilidade adaptativa, permitindo a incorporação contínua de inovação tecnológica e aprendizado regulatório (FCO/ARUP, 2017; INVERNIZZI et al., 2020).

Na Ásia, o panorama regulatório do descomissionamento offshore é mais heterogêneo, refletindo os diferentes estágios de maturidade da indústria de óleo e gás na região. Em geral, observa-se um movimento recente de consolidação de marcos regulatórios inspirados em modelos internacionais, sobretudo nos padrões britânico (OEUK) e australiano (NOPSEMA).

No contexto australiano, a autoridade independente NOPSEMA exerce papel central na supervisão das operações, segurança e desempenho ambiental. A NOPSEMA Guidance A818951 (2020) define requisitos para a preparação de planos de descomissionamento e enfatiza a importância de avaliações ambientais baseadas em risco, além de promover uma forte integração com as obrigações de Environmental Plans (EPs) e Safety Case Regulations.

Nos Estados Unidos, o descomissionamento offshore é regulamentado de forma integrada pelos órgãos federais BOEM) e BSEE, ambos vinculados ao Department of the Interior. O documento A Citizen’s Guide to Offshore Oil and Gas Decommissioning in Federal Waters off California (BOEM/BSEE, 2019) sintetiza um modelo de governança interagencial no qual múltiplas instituições — como USACE, USCG, EPA e NOAA — atuam de forma coordenada. Esse arranjo permite conciliar as dimensões técnica, ambiental, social e de segurança marítima sob uma perspectiva de licenciamento cooperativo e transparente.

Na Noruega, o regime regulatório é orientado pela Petroleum Act e supervisionado pela Norwegian Petroleum Directorate (NPD) e pela Norwegian Environment Agency (NEA).

O Decommissioning Work Breakdown Structure Handbook (NORSK OLJE OG GASS, 2020) constitui um guia técnico que define a estrutura analítica do trabalho (Work Breakdown Structure – WBS) e a base para a elaboração de estimativas de custo auditáveis. O modelo norueguês é reconhecido pela sua precisão na rastreabilidade de custos, pela transparência no compartilhamento de informações entre governo e operadoras e pela adoção de metodologias de planejamento baseado em risco, que permitem otimizar cronogramas e recursos em ambientes de alta complexidade técnica.

Já no âmbito das organizações multilaterais, destaca-se o World Bank/COCPO Toolkit (2010), mencionado anteriormente, que serviu de base para outras iniciativas internacionais, como o Commonwealth Secretariat Oil and Gas Decommissioning Toolkit (OGEER, 2022). O Toolkit do Banco Mundial propõe um modelo genérico de maturidade institucional para países que ainda estão estruturando seus regimes de descomissionamento. Essa abordagem evoluiu com o Framework for Regulation desenvolvido pelo Foreign and Commonwealth Office (FCO) e pela Arup (2017), que delineia os elementos centrais de um regime regulatório eficaz, dentre eles, a clareza de objetivos de política pública e transparência e rastreabilidade.

Além dos marcos regulatórios, observa-se uma tendência transversal à incorporação de princípios de sustentabilidade e economia circular nas políticas de descomissionamento. Invernizzi et al. (2020) e Fortune & Paterson (2018) destacam que a integração entre desativação e reaproveitamento de estruturas pode reduzir custos e emissões, além de gerar novos mercados de reciclagem e inovação tecnológica. Essa visão, compartilhada por Watson et al. (2023), amplia o entendimento de que o descomissionamento não deve ser visto apenas como encerramento de atividades, mas como parte de uma transição industrial e ecológica, com oportunidades de aprendizado, emprego e reconfiguração produtiva.

De forma comparativa, as experiências internacionais convergem em três eixos fundamentais:

I. Governança integrada e accountability, com papéis institucionais claros e previsibilidade regulatória (Reino Unido, EUA, Noruega);

II. Gestão estratégica baseada em risco e custo auditável, garantindo eficiência técnica e financeira (Austrália, Noruega, Reino Unido); e

III. Sustentabilidade e engajamento social, com foco em indicadores ambientais, transparência e economia circular (Reino Unido, Banco Mundial, Commonwealth).

Esse conjunto de diretrizes oferece base para o desenvolvimento de um modelo brasileiro adaptado, capaz de consolidar práticas regulatórias, técnicas e ambientais sob um enfoque sistêmico, interdisciplinar e orientado à sustentabilidade.

2.3 A PROPOSTA DE UM GUIA ESTRUTURADO NO CONTEXTO NACIONAL

O planejamento do descomissionamento deve ser conduzido de forma sistemática, multidisciplinar e preventiva, considerando múltiplos aspectos e conhecimentos como forma de embasamento teórico. Essa fase constitui um instrumento estratégico para garantir o encerramento responsável das atividades.A análise detalhada de cada um dos impactos será apresentada na Seção de Resultados e Discussões, permitindo uma compreensão aprofundada de sua relevância e das implicações para o processo de descomissionamento

Embora a Resolução ANP nº 817/2020 represente um avanço ao exigir a elaboração de PDI's, o ambiente regulatório brasileiro ainda se mostra dividido, sem ainda uma regulação única que envolva algumas esferas institucionais como a Marinha, o Ibama, a CNEN e o Ministério do Trabalho. Essa complexidade requer uma abordagem integrada e multidisciplinar, voltada para assegurar a segurança operacional, a proteção ambiental e o cumprimento da responsabilidade social.

A apresentação de elementos fundamentais que devem ser levados em consideração no processo de planejamento do descomissionamento para elaboração de um guideline nacional desempenha um papel fundamental ao organizar e padronizar informações.

3 MÉTODO

O presente estudo adota uma abordagem descritiva (GIL, 2022), focada em delinear e detalhar as etapas cruciais que compõem o planejamento de um processo de descomissionamento de instalações no setor de O&G. A estrutura proposta foi desenvolvida com base em pesquisa na literatura, incluindo artigos e guidelines internacionais, que permitiu identificar os aspectos fundamentais envolvidos nessa temática. O principal objetivo desta metodologia é mapear e apresentar de forma organizada as fases essenciais.

A pesquisa teve seu ponto de partida imediatamente após a decisão formal de descomissionamento ter sido tomada, iniciando-se com um levantamento exaustivo das macro atividades inerentes a este processo. A partir deste levantamento, procedeu-se à criação de um fluxograma, um instrumento visual fundamental para estabelecer a ordem lógica das etapas (sequenciais) e identificar a existência de macro atividades.

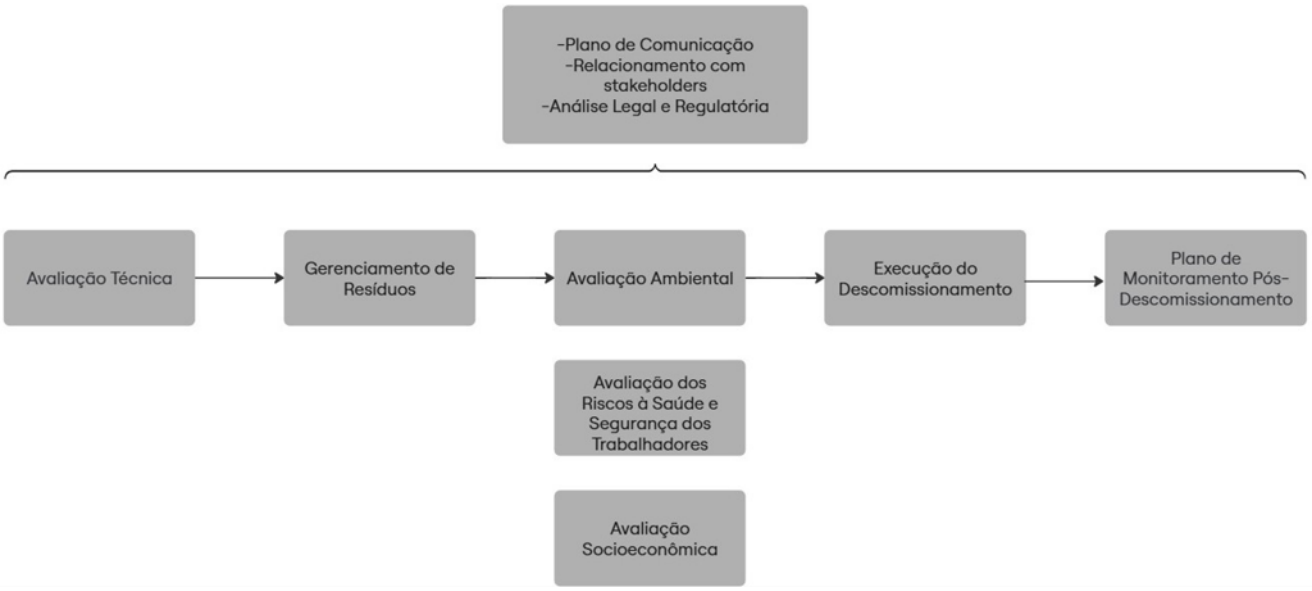
Para consolidar o conhecimento e facilitar a aplicação prática, foi elaborada uma proposta de elementos fundamentais para a construção de um guideline. Para a criação deste documento de orientação, exploramos os principais aspectos de cada etapa mapeada. Assim, cada fase do processo foi minuciosamente descrita, contemplando sua definição, os elementos centrais necessários para sua execução.

4 RESULTADOS – DIRETRIZES PARA FRAMEWORK APLICADO E AUDITÁVEL

4.1 MACROELEMENTOS PARA A ESTRUTURAÇÃO DE UM GUIA CONSOLIDADO

A sequência de resultados da pesquisa descritiva inicia-se pelo mapeamento e estruturação das macroatividades do processo estudado. Conforme a metodologia adotada, o processo de descomissionamento de instalações no setor de O&G foi desfragmentado nas principais etapas, conforme apresenta a Figura 1 a seguir.

Figura 1: Macroelementos para a estruturação de um guia consolidado.



Fonte: Os autores (2025)

O fluxograma detalhado do processo busca estabelecer uma ordem das fases sequenciais e identifica as atividades que podem ser executadas simultaneamente, fornecendo a base para a análise dos aspectos críticos.

Na sequência, cada etapa do fluxograma é descrita individualmente, com o propósito de oferecer uma compreensão estruturada das ações envolvidas, seus objetivos específicos e as interfaces existentes entre as fases do processo.

4.1.1 COMUNICAÇÃO E RELACIONAMENTO COM STAKEHOLDERS

A análise da etapa de “Plano de comunicação e relacionamento com stakeholders” demonstrou que sua eficácia é determinada pela identificação dos atores que impactam ou são impactados pelo descomissionamento, considerando a caracterização do segmento de atuação, tipo de organização e perfil de formação e experiência dos interlocutores atuantes no processo. Os resultados indicam que, por ser uma atividade que se estende por todo o processo, a execução correta deste plano é vital para o sucesso do projeto.

Ainda nesse contexto, um plano de governança e interfaces regulatórias assegura a mitigação de divergências e otimização de tempo em processo de aprovações previstas por órgãos reguladores e fiscalizadores. Propõe-se que o plano contemple: (i) identificação das autoridades competentes por tema (ANP; Ibama; Marinha; CNEN; Ministério do Trabalho); (ii) mecanismo de garantia selecionado (p.ex., seguro-garantia, letter of credit, trust/fundo de desativação), com premissas e gatilhos de execução; (iii) matriz de licenças/autorizações com prazos críticos; (iv) pontos de controle inspirados em recomendações de auditoria governamental (planejamento antecipado, estimativas de custo auditáveis, rastreabilidade de decisões, transparência de resultados). Este arranjo fortalece a previsibilidade, a financiabilidade do plano e a proteção do interesse público.

A definição de cada uma das etapas exige um planejamento estratégico dos canais e conteúdo de comunicação, visando a transparência e o engajamento. Quando o plano falha em sua execução, o principal risco materializado é a resistência ativa de comunidades e grupos de interesse, resultando em falta de engajamento ou na perda de aliados estratégicos (como órgãos governamentais e ONGs), o que pode levar a atrasos regulatórios e prejuízos à reputação da operadora.

4.1.2 AVALIAÇÃO TÉCNICA

Segundo o Guideline de Descomissionamento Offshore de O&G de UK (2018), a avaliação da viabilidade técnica das alternativas de descomissionamento deve fundamentar-se na experiência consolidada da indústria e na disponibilidade de equipamentos, além das potenciais inovações tecnológicas que possam impactar sua implementação.

De acordo com o relatório técnico da Shell referente à Análise Comparativa das alternativas de descomissionamento realizada para o Campo de Brent (2017), o aspecto técnico foi avaliado por meio de uma viabilidade técnica, a qual foi determinado a partir da consideração de aspectos associados a cada alternativa, como: grau de planejamento e preparação, complexidade da alternativa, grau de ineditismo das operações e equipamentos, vulnerabilidade a condições meteorológicas adversas e disponibilidade de equipamentos sobressalente.

Estudos como os de Na et al. (2017) e Muller et al. (2018) concentram conceitos de integridade estrutural das infraestruturas descomissionadas, bem como elementos como gerenciamento logístico das operações, com ênfase especial na viabilidade técnica e temporal. Tecnologias de detecção de riscos também foram destacadas pelos estudos de Grandi et al. (2017), visando mitigar a probabilidade de falhas operacionais.

Sendo assim, com base em uma análise crítica da literatura, que incluiu estudos científicos e diretrizes internacionais reconhecidas, foi possível identificar e consolidar alguns conceitos e elementos fundamentais que devem compor uma avaliação técnica no processo de descomissionamento offshore no setor de óleo e gás. Sendo assim, considera-se que Avaliação Técnica é uma etapa que envolve a identificação, análise e definição das alternativas mais viáveis para a desativação de uma instalação, envolvendo estudos acerca das condições estruturais e operacionais dos ativos a serem descomissionados, bem como os riscos e a logística associada às diferentes possibilidades de remoção, abandono ou reaproveitamento da estrutura.

4.1.3 AVALIAÇÃO AMBIENTAL

A avaliação ambiental busca compreender os impactos de cada alternativa sobre os ecossistemas marinhos. Assim, estudos científicos e avaliações de risco ambiental, constituem um dos fatores mais relevantes no processo de tomada de decisão referente às opções de descomissionamento no setor

de O&G. As decisões adotadas durante o processo influenciarão diretamente o tipo, a intensidade e a duração dos impactos causados no ambiente.

Relatórios de impacto ambiental, de uma maneira geral, tem como objetivo identificar os potenciais impactos ambientais por meio da análise das interações entre as atividades de descomissionamento propostas e o ambiente local, considerando ainda as manifestações e preocupações dos stakeholders envolvidos (BEIS, 2018). O Guidance Notes elaborado pelo (EIS e OPRED apresenta o programa de descomissionamento do campo de Murchison no Reino Unido e lista os possíveis elementos impactados pelo processo de descomissionamento, no âmbito ambiental, como: ambiente marinho, aves e outros usuários do mar, por exemplo. Como impactos principais, o documento aponta alguns elementos, como: emissões atmosféricas, ruídos, perturbação no leito marinho e danos à pesca. Carneiro et. al (2024) menciona indicadores como: probabilidade de letalidade no caso de colisão de embarcação, ressuspensão de sedimentos e contaminantes, dano físico ao leito marinho, potencial dispersão de espécies invasoras e degradação de materiais (metais, anodos, coal tar, polímeros), por exemplo.

Nesse contexto, a NOPSEMA apresenta considerações para preparação de atividades relacionadas ao descomissionamento no setor de O&G. Em documento publicado em 2020 pode-se listar elementos essenciais para uma avaliação ambiental, como: ruídos, luminosidade, emissões de GHG (gases do efeito estufa) e dispersão de espécies invasoras.

Sendo assim, considera-se que a Avaliação Ambiental é uma etapa que envolve a avaliação dos impactos ambientais das atividades de descomissionamento, considerando o mapeamento dos passivos ambientais e potenciais riscos, além da caracterização de áreas potencialmente contaminadas e/ou com potencial de serem contaminadas.

4.1.4 GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS

A etapa de “Gerenciamento de Resíduos” revelou a criticidade do diagnóstico preciso dos resíduos gerados para a conformidade ambiental e eficiência operacional. A definição desta etapa abrange a identificação, classificação e quantificação de todo o passivo (metálicos, orgânicos, perigosos e/ou contaminados) que será removido das instalações offshore e onshore.

Os resultados demonstram que para a gestão ambientalmente adequada é necessária a elaboração e implementação rigorosa do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) conforme Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010) que institui a política nacional de resíduos sólidos e rege a gestão dos resíduos gerados (MORAES; NEVES, 2018). Este plano direciona as micro atividades subsequentes, como a segregação na fonte, o tratamento preliminar (limpeza e descontaminação), o transporte seguro e a destinação final prioritária, que deve incluir a reutilização e a reciclagem dos materiais, minimizando o volume destinado a aterros ou incineração.

Pode-se perceber que a imprecisão no diagnóstico dos resíduos gerados durante o descomissionamento acarreta diversos riscos ambientais, operacionais e financeiros.

No âmbito legal e ambiental, a falha em identificar e classificar corretamente os materiais perigosos eleva drasticamente o risco de acidentes durante o manuseio e transporte, além de resultar em descumprimento da legislação ambiental e regulatória, sujeitando a operadora a multas elevadas e sanções administrativas, comprometendo seriamente a reputação da empresa.

4.1.5 AVALIAÇÃO DOS RISCOS À SAÚDE E SEGURANÇA DOS TRABALHADORES

Diante da etapa de “Avaliação dos riscos à saúde e segurança dos trabalhadores” foi observado que tal fase não se restringe apenas aos operadores diretos, mas deve englobar todos os públicos potencialmente impactados durante a desmobilização. Segundo Ogeer (2022) os riscos de segurança surgem tanto da natureza perigosa dos hidrocarbonetos quanto das próprias atividades de desativação.

A realização desta etapa exige a identificação e a mitigação dos riscos físicos inerentes à demolição, manuseio de materiais contaminados e trabalho em altura ou submerso. Os resultados enfatizam a necessidade de estender a avaliação aos riscos que impactam as comunidades vizinhas, especialmente aqueles associados ao transporte e ao desmantelamento onshore dos resíduos.

Adicionalmente, o estudo sublinha que o setor de recursos humanos deve desempenhar um papel ativo e essencial, abordando a saúde mental dos trabalhadores que enfrentam o estresse da perda iminente do emprego ou a transição para novas funções.

4.1.6 AVALIAÇÃO SOCIOECONÔMICA

A etapa de “Avaliação socioeconômica” demonstrou a sua relevância estratégica na identificação e mitigação dos efeitos adversos do descomissionamento. É necessário a realização de análises de externalidades sobre o emprego e a cadeia de suprimentos local, com o objetivo de quantificar e planejar a transição.

Os resultados indicam que os potenciais riscos socioeconômicos mais críticos incluem o aumento do desemprego devido ao encerramento das operações, a redução da arrecadação de impostos e royalties, interrupção de programas de responsabilidade social corporativa e o consequente fechamento de empresas da cadeia de suprimentos que dependiam da atividade de produção (OGEER, 2022).

Para mitigar esses efeitos, é fundamental que esta avaliação subsidie planos de requalificação profissional para os trabalhadores e incentive a diversificação econômica local, transformando, sempre que possível, o descomissionamento em uma nova oportunidade para a indústria de serviços.

Existem frameworks capazes de apoiar nessa etapa como destacado por Barbosa et al. (2023) com o uso da ferramenta Scoring de Impacto (SIm) desenvolvida pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) que avalia, a partir de um questionário contendo 60 perguntas subdivididas em cada dimensão, os potenciais impactos econômicos, sociais e ambientais. Ou até mesmo a metodologia estruturada pelo International Finance Corporation (IFC) denominada "Anticipated Impact Measuring and Monitoring” (AIMM) que avalia os efeitos de um projeto sobre as partes interessadas, a economia, bem como o meio ambiente e a sociedade.

4.2 EXECUÇÃO DO DESCOMISSIONAMENTO

A etapa de “Execução do descomissionamento” é definida como a materialização das atividades de remoção final de pessoal, equipamentos e materiais, objetivando deixar o local seguro e apto para seu uso futuro. A definição da etapa exige um prévio e detalhado levantamento de atividades, equipamentos e demanda de mão de obra.

Os resultados apontam a importância estratégica de considerar o aproveitamento da expertise dos antigos colaboradores, o que frequentemente demanda capacitação prévia para as novas tarefas; alternativamente, torna-se necessário o recrutamento e seleção de novos profissionais.

Os riscos primários nesta fase são a ocorrência de problemas ambientais graves se a remoção e destinação de resíduos não for realizada de forma adequada. Além disso, a ineficiência ou o gerenciamento inadequado resultam em atrasos na desocupação do local, gerando aumento significativo dos custos de locação de equipamentos e potenciais multas por não cumprimento dos prazos regulatórios estabelecido

4.3 PLANO DE MONITORAMENTO PÓS DESCOMISSIONAMENTO

A etapa “Plano de monitoramento pós-descomissionamento” confirmou sua função essencial como garantia de conformidade e segurança a longo prazo, representando a fase final de verificação e controle da eficácia das ações executadas.

As atividades centrais exigidas, como a coleta de amostras de solo, água e ar para análise de contaminantes e a verificação contínua da estabilidade estrutural das instalações e da ausência de novos vazamentos, são cruciais.

Os resultados da pesquisa destacam que os riscos potenciais dessa fase estão ligados à descoberta de contaminação remanescente ou ao surgimento de problemas ambientais ou estruturais não previstos.

A materialização desses riscos implica diretamente em gastos adicionais e significativos com remediação e manutenção a longo prazo, evidenciando a necessidade de um plano robusto para proteger a operadora de passivos futuros.

4.4 ANÁLISE LEGAL E REGULATÓRIA

A etapa de “Análise legal e regulatória” revelou-se fundamental para a previsibilidade e conformidade ao longo de todo o planejamento do descomissionamento, sendo definida pela necessidade de identificar e consolidar o entendimento de todas as leis, regulamentos, licenças e permissões aplicáveis à desativação e remoção segura e legal das instalações. Sua análise é considerada transversal às demais etapas, pois pode estar inserida em cada uma delas através de uma abordagem singular das particularidades de cada macro atividade.

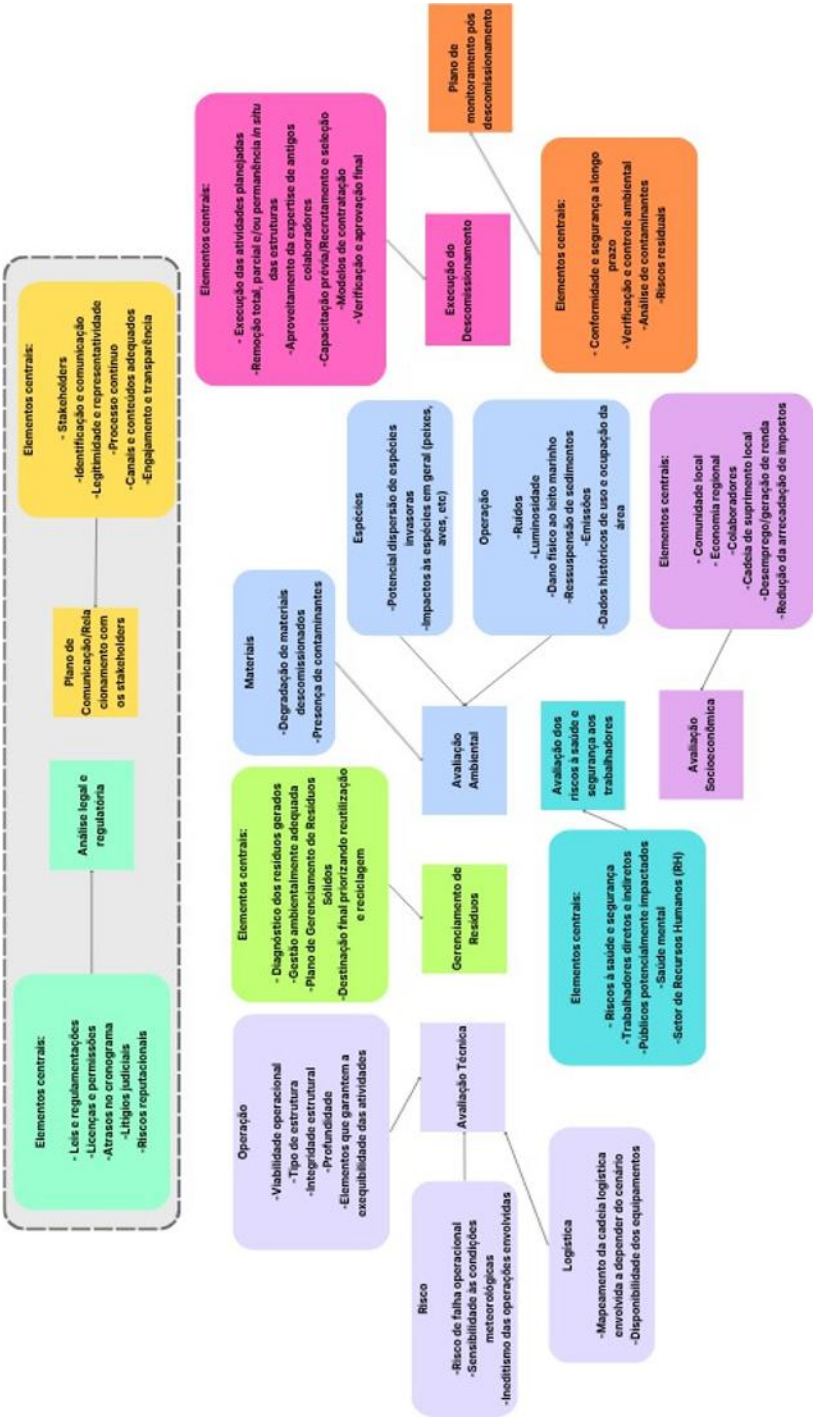
No Brasil, o descomissionamento de plataformas é regulado pela Resolução ANP nº 817/2020, estabelecendo parâmetros e determinando os procedimentos a serem adotados ao longo dos processos (SANT' ANA, 2024).

A falha nesta análise gera riscos significativos: desde atrasos no cronograma causados por processos burocráticos pendentes, até a imposição de multas e sanções por descumprimento regulatório. Outros desafios centrais identificados incluem as dificuldades em obter aprovações e licenças para planos de descomissionamento inovadores e o aumento da probabilidade de litígios judiciais. Em última instância, a má gestão desta etapa regulatória resulta na severa perda de reputação da operadora perante stakeholders e órgãos de controle, devido a impactos ambientais e sociais inadequadamente gerenciados.

4.5 ELEMENTOS CENTRAIS PARA A ESTRUTURAÇÃO DE UM GUIA CONSOLIDADO

A partir de uma análise crítica da literatura, composta por estudos científicos e diretrizes internacionais consolidadas, foi possível identificar e sistematizar elementos essenciais que devem orientar uma avaliação consistente em relação ao tema abordado. A Figura 2 ilustra uma proposta dos principais elementos que devem ser contemplados em cada dimensão de análise dentro de uma macroavaliação setor offshore de O&G.

Figura 2: Elementos centrais para a estruturação de um guia consolidado



Fonte: Os autores (2025)

Considera-se que essa consolidação constitui um passo relevante para o desenvolvimento de um guia nacional de referência, capaz de orientar o processo de avaliação multidisciplinar no descomissionamento offshore.

5 DISCUSSÕES

O descomissionamento offshore configura-se, no cenário contemporâneo, como um campo multidimensional de governança, no qual convergem aspectos técnicos, ambientais, socioeconômicos, regulatórios e de segurança operacional. A literatura e as práticas internacionais demonstram que sua eficácia depende menos de um conjunto isolado de normas e mais da capacidade sistêmica de coordenação entre atores, instrumentos e objetivos públicos (FCO/ARUP, 2017; WORLD BANK, 2010).

O guia proposto neste artigo se insere nesse contexto como uma tentativa de transposição estruturada e adaptada das melhores práticas globais para a realidade institucional brasileira, incorporando lições consolidadas, mas também propondo ajustes às lacunas locais de coordenação, rastreabilidade e transparência.

5.1 CONVERGÊNCIAS COM MODELOS INTERNACIONAIS

A análise comparada revela fortes convergências conceituais entre o framework proposto e as diretrizes internacionais de referência.

No modelo do World Bank (2010), o descomissionamento é concebido como uma política pública de ciclo de vida, organizada em cinco pilares: arcabouço legal e institucional, boas práticas ambientais e sociais, garantias financeiras, fiscalização e engajamento de stakeholders. O guia brasileiro retoma essa lógica, expandindo-a com a integração multicritério (MCDA) e a inclusão explícita da dimensão socioeconômica, ausente no modelo original. Essa ampliação é coerente com a evolução recente das agendas globais de sustentabilidade e de just transition, que enfatizam o papel do descomissionamento como vetor de reconversão produtiva e requalificação territorial (LEITE & BELCHIOR, 2023).

O Commonwealth Oil & Gas Decommissioning Toolkit (OGEER, 2022) é o que mais se aproxima do enfoque deste artigo em termos de aplicabilidade. Ambos os modelos se orientam por diretrizes operacionais detalhadas, adaptáveis a múltiplos contextos nacionais e com ênfase na institucionalização de instrumentos de governança. Entretanto, enquanto o toolkit da Commonwealth é dirigido principalmente a governos que estão criando regimes regulatórios, o guia proposto aqui avança no sentido de estruturar uma ferramenta de referência prática, aplicável por operadores,

consultores, reguladores e pesquisadores, com potencial de funcionar como um “padrão de maturidade” das práticas de descomissionamento no Brasil.

O modelo britânico (OEUK/BEIS/OPRED), amplamente reconhecido como benchmark internacional, apresenta pontos de convergência importantes: a ênfase na avaliação comparativa de alternativas (Comparative Assessment), na exigência de garantias financeiras e na rastreabilidade documental. O guia brasileiro incorpora esses mesmos fundamentos, mas amplia o foco para contemplar indicadores de desempenho social e econômico, seguindo uma abordagem mais holística de sustentabilidade.

A NOPSEMA (2020), autoridade reguladora australiana, introduz o princípio da responsabilidade contínua, pelo qual o operador permanece legal e moralmente responsável pelo local descomissionado mesmo após a conclusão das operações. Essa noção é plenamente incorporada no guia proposto, tanto no eixo de governança e garantias regulatórias quanto na fase de monitoramento pós-descomissionamento, reforçando o vínculo entre encerramento e legado.

Já o modelo norte-americano (BOEM/BSEE, 2019) destaca-se pela aplicação de protocolos rigorosos de verificação (site clearance) e pela obrigatoriedade de planos de monitoramento com indicadores geotécnicos e ecológicos mensuráveis — princípios replicados aqui e expandidos com a lógica multicritério, que agrega dimensões sociais e econômicas à avaliação de longo prazo.

Em suma, as convergências mais expressivas do guia brasileiro com os modelos internacionais concentram-se em quatro pilares comuns:

1. Planejamento antecipado e abordagem sistêmica de ciclo de vida;

2. Integração técnica, ambiental e social sob princípios de sustentabilidade;

3. Mecanismos de governança e garantias financeiras robustos; e Transparência e monitoramento contínuo com base em indicadores verificáveis.

5.2 INOVAÇÕES E AVANÇOS DO FRAMEWORK PROPOSTO

O guia proposto neste estudo apresenta três inovações estruturantes em relação aos modelos existentes:

I. Integração multicritério (MCDA) como base metodológica.

Ao adotar uma estrutura analítica que considera simultaneamente critérios técnicos, ambientais, econômicos, sociais, regulatórios e de governança, o framework supera a fragmentação observada em muitos regimes internacionais, nos quais as dimensões são tratadas de forma paralela. Essa integração favorece a tomada de decisão equilibrada e transparente, fortalecendo o caráter interdisciplinar do descomissionamento sustentável (WATSON et al., 2023; FORTUNE & PATERSON, 2018).

II. Inclusão sistemática da dimensão socioeconômica e da participação dos stakeholders.

Enquanto os modelos internacionais enfatizam predominantemente as dimensões técnica e ambiental, o guia brasileiro incorpora métricas de impacto socioeconômico, instrumentos de engajamento participativo e indicadores de relacionamento comunitário. Essa ampliação é coerente com a metodologia desenvolvida pelo grupo DESCOM.SUB e reflete um diferencial de governança inclusiva, alinhado ao paradigma da quinta hélice — que articula governo, academia, indústria, sociedade civil e meio ambiente (PALHANO et al., 2025).

III. Digitalização, rastreabilidade e economia circular.

Inspirado nas práticas de material tracking observadas em portos noruegueses e australianos, o guia propõe a criação de passaportes digitais para materiais descomissionados, baseados em tecnologias blockchain e sistemas GIS. Essa inovação promove a transparência na destinação de resíduos, o controle de emissões associadas ao transporte e a certificação ambiental de recicladoras — contribuindo para o avanço da cadeia reversa sustentável e o fortalecimento de um mercado secundário de materiais offshore.

Esses elementos distinguem o framework brasileiro não apenas como um compêndio de boas práticas, mas como um instrumento de transformação institucional, capaz de induzir inovação, reduzir riscos e fomentar a confiança pública no processo de descomissionamento.

5.3 LACUNAS E DESAFIOS PERSISTENTES

Apesar dos avanços conceituais e estruturais, algumas lacunas e desafios permanecem para a consolidação de um regime nacional plenamente integrado.

A primeira refere-se à fragmentação institucional ainda observada no Brasil. Diferentemente dos modelos do Reino Unido ou da Noruega, que contam com autoridades únicas de coordenação (OPRED,

PSA), o cenário brasileiro distribui competências entre diversas agências (ANP, Ibama, Marinha, CNEN, Ministério do Trabalho), sem um protocolo formal de interoperabilidade. Essa ausência de coordenação pode resultar em sobreposição de exigências, duplicidade de análises e indefinição de responsabilidades em caso de passivos futuros.

A segunda lacuna está ligada à estrutura de garantias financeiras, que embora prevista em norma (ANP 854/2021), ainda carece de um mecanismo segregado, revisável e indexado à evolução dos custos reais. Experiências como o Decommissioning Security Agreement (UK) e os Trust Funds (EUA) demonstram a importância de vincular a provisão financeira à fase produtiva, evitando o risco de descapitalização tardia.

O terceiro desafio é de natureza informacional e tecnológica: a ausência de uma plataforma nacional unificada de dados sobre descomissionamento, com acesso público e interoperabilidade com bancos de dados ambientais, industriais e portuários. A criação de tal sistema, sugerida por este artigo, permitiria consolidar o conhecimento institucional e alimentar a governança adaptativa do setor.

Por fim, persiste o desafio da capacitação técnica e institucional, especialmente no que tange à análise integrada de riscos e à aplicação de metodologias multicritério. A consolidação de uma cultura regulatória baseada em evidências exigirá investimento em formação de quadros técnicos e em cooperação entre universidades, agências e operadoras.

5.4 CONTRIBUIÇÃO ESTRATÉGICA DO GUIA

Ao propor uma estrutura conceitual e operacional baseada em cinco eixos integradores, o guia nacional para descomissionamento offshore contribui para três frentes estratégicas:

- Política pública e regulação: fornece subsídios para o aprimoramento das normas e a harmonização das competências institucionais;

- Gestão corporativa: oferece um roteiro de conformidade e planejamento auditável, apoiando as operadoras no cumprimento das obrigações e na gestão de riscos;

- Ciência e inovação: estabelece uma base metodológica para pesquisa aplicada, abrindo espaço para o desenvolvimento de ferramentas digitais, indicadores de desempenho e métricas de sustentabilidade.

Em perspectiva internacional, o framework brasileiro não busca reproduzir mecanicamente modelos estrangeiros, mas reinterpretá-los à luz de suas próprias condições institucionais e socioeconômicas. Essa postura propositiva, e não meramente imitativa, representa o passo mais relevante do artigo: a construção de uma abordagem genuinamente adaptada à realidade nacional, mas alinhada com os padrões globais de excelência e com o pensamento sustentável que orienta a transição energética.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O descomissionamento offshore no setor de óleo e gás configura-se como uma etapa inevitável diante da crescente maturidade dos campos exploratórios. Este artigo apresentou diretrizes que visam orientar a elaboração de planos de descomissionamento, através da identificação e sistematização de um conjunto de conceitos e elementos centrais ao processo.

As diretrizes propostas neste trabalho contemplam aspectos multidisciplinares. Essa abordagem integrada é essencial para garantir que o descomissionamento seja conduzido de forma eficiente, transparente e alinhada aos princípios da sustentabilidade e da economia circular.

Por outro lado, a abordagem integrada limita em partes o aprofundamento dos aspectos, como limitação da pesquisa sinaliza-se a não contemplação da análise dos custos, uma vez que se faz necessário investigar a estrutura de custos para diferentes alternativas (AHIAGA-DAGBUI, D. D. et al., 2017).

Por fim, recomenda-se que estudos futuros aprofundem os elementos centrais do processo de descomissionamento, bem como modelagem de ciclo de vida e avaliação dos custos. Em relação ao ciclo de vida, a importância de um estudo mais detalhado é inevitável em um contexto em que a indústria de O&G enfrenta pressões crescentes para adoção de práticas mais sustentáveis na gestão do fim de vida útil das suas estruturas descomissionadas. A análise de custos também assume papel relevante, uma vez que a literatura destaca que a principal dificuldade do planejamento do descomissionamento está em garantir o equilíbrio dos recursos financeiros (LI et al., 2019).

A estruturação de um guia que consolide os requisitos mínimos de análise para o planejamento de descomissionamento envolve uma avaliação multidisciplinar detalhada. Cada uma dessas dimensões apresenta especificidades que influenciam diretamente a tomada de decisão e a definição de estratégias para o encerramento das atividades offshore. Diante desse cenário, o presente artigo teve

como objetivo identificar a lacuna existente no contexto nacional quanto à ausência de diretrizes mínimas e consolidadas que orientem de forma sistematizada o processo de avaliação de cada área inserida no planejamento do descomissionamento. A partir dessa constatação, buscou-se propor um conjunto de elementos centrais de análise. Esses elementos visam oferecer uma base conceitual mínima e consolidada para o desenvolvimento de uma macroavaliação consistente, capaz de subsidiar futuros estudos, resoluções e guidelines voltados à análise e gestão responsável das estruturas offshore em fase de desativação.

REFERÊNCIAS

ABB CONSULTING. Decommissioning Cost Estimation and Planning. ABB Group, 2015.

AHIAGA-DAGBUI, D. D. et al. Costing and technological challenges of offshore oil and gas decommissioning in the U.K. North Sea. Journal of Construction Engineering and Management, v. 143, n. 7, p. 05017008, jul. 2017.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Painel Dinâmico de Descomissionamento de Instalações de Exploração e Produção. 2025. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZjFlMWI0MDgtNWNiNC00OTZlLWI3NGQt OGM3MjQwODhjMTMwIiwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTI0YTYtNGI0Mi1iN2VmLTEy NGFmY2FkYzkxMyJ9. Acesso em: 29 set. 2025.

ARUP; FOREIGN AND COMMONWEALTH OFFICE (FCO). Framework for Regulation: Decommissioning of Offshore Oil and Gas Installations and Structures. Londres: ARUP/FCO, 2017.

BARBOZA, R. M. et al. Como medir impacto? A ferramenta de scoring de impacto (SIm) do BNDES e o futuro dos bancos de desenvolvimento. Cadernos do Desenvolvimento, v. 18, n. 35, p. 301–336, maio-ago. 2023.

BEIS – Department for Business, Energy and Industrial Strategy. Guidance Notes: Decommissioning of Offshore Oil and Gas Installations and Pipelines. Offshore Petroleum Regulator for Environment and Decommissioning (OPRED), 2018. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/760560/Decom_Guidance_Notes_November_2018.pdf. Acesso em: 10 out. 2025.

BOEM/BSEE – Bureau of Ocean Energy Management; Bureau of Safety and Environmental Enforcement. A Citizen's Guide to Offshore Oil and Gas Decommissioning in Federal Waters off California. Department of the Interior, 2019.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm . Acesso em: 10 out. 2025.

CARNEIRO, P. R. F. et al. A methodological approach for an objective environmental impact assessment to support decision-making in the decommissioning of oil and gas subsea installations in Brazil. Journal for Nature Conservation, v. 79, p. 126619, 2024.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Normas CNEN NN 3.01, 5.01, 8.01 e 8.02. Rio de Janeiro, 2014.

COMMONWEALTH SECRETARIAT. Oil and Gas Decommissioning Toolkit: Practical Guidance for Governments. Londres: Oceans and Natural Resources Division, Commonwealth Secretariat, 2022. ISBN (e-book): 9780850920048.

DECC – Department of Energy and Climate Change. Implementation of the Regulatory Regime for the Decommissioning of Offshore Oil and Gas Installations and Structures on the UK Continental Shelf. Londres: DECC, 2011.

DOYLE, M. W. et al. Environmental science: aging infrastructure and ecosystem restoration. Science, v. 319, p. 286–287, 18 jan. 2008.

FGV ENERGIA. Descomissionamento Offshore no Brasil: oportunidades, desafios & soluções. Ano 8, jan. 2021. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br . Acesso em: 5 out. 2025.

FORTUNE, C. M.; PATERSON, J. The environmental legacy of offshore oil and gas infrastructure: Decommissioning challenges and opportunities. Marine Policy, v. 95, p. 361–371, 2018.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022.

GRANDI, S. et al. Planning for a safe and sustainable decommissioning of offshore hydrocarbon platforms: complexity and decision support systems. Geoingegneria Ambientale e Mineraria, v. 152, p. 101–108, 2017.

INVERNIZZI, D. C. et al. Governing the decommissioning of offshore oil and gas infrastructures: A system-level approach. Marine Policy, v. 113, p. 103793, 2020.

IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. Panorama Geral do Setor de Petróleo e Gás: uma agenda para o futuro. Rio de Janeiro: IBP, 2024. Disponível em: https://www.ibp.org.br/documents/276/panorama-geral-do-setor-de-og-portugues.pdf. Acesso em: 2 out. 2025.

LEITE, B. E.; BELCHIOR, B. New frontiers for decommissioning in Brazil. The Journal of Sustainable Development Law and Policy, v. 14, n. 1, p. 117–139, 2023.

LI, J. et al. Decommission in petroleum industry: current status, future trends and policy advices. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 237, p. 042013, 2019.

MARINHA DO BRASIL. Normas da Autoridade Marítima – NORMAM 07, 08 e 11. Diretoria de Portos e Costas, 2020.

MARTINS, C. P. Descomissionamento Offshore no Brasil: desafios regulatórios e institucionais. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.

MORAES, F.; NEVES, P. Descomissionamento de unidades inservíveis no Brasil: discutindo fantasmas não nascidos. Boletim de Conjuntura do Setor Energético – FGV Energia, v. 7, p. 28–33, 2018.

MULLER, D. T. et al. Field life extension and integrity management in Campos Basin. In: Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, TX, 30 abr.–3 maio 2018.

NA, K. L. et al. An expert knowledge-based decommissioning alternative selection system for fixed oil and gas assets in the South China Sea. Ocean Engineering, v. 130, p. 645–658, 2017.

NORSK OLJE OG GASS. Decommissioning Work Breakdown Structure Handbook. Stavanger: Norwegian Petroleum Directorate, 2020.

NOPSEMA – National Offshore Petroleum Safety and Environmental Management Authority. Considerations when preparing for decommissioning activities. Documento nº A818951, 2020.

OIL & GAS UK. Decommissioning Insight 2017. Londres: OGUK, 2017.

OGEER, N. Oil and Gas Decommissioning Toolkit: Practical Guidance for Governments. Londres: Commonwealth Secretariat, 2022. ISBN 9780850920048.

PALHANO, L. C. P.; LEITE, B. E.; IGOR, M.; INFANTE, E. C. Pensamento Sustentável e Governança Colaborativa no Descomissionamento Offshore: modelo de quíntupla hélice aplicado ao Brasil. Rio de Janeiro: DESCOM.SUB/COPPE-UFRJ, 2025.

PROCEED GROUP. A Guide to System Decommissioning. 7 mar. 2025. Disponível em: https://proceedgroup.com/decommissioning/system-decommissioning-guide. Acesso em: 10 out. 2025.

RIBEIRO, A.; SOARES, H.; JÚNIOR, W. P. EPRD: a new frontier in subsea decommissioning in Brazil. In: Offshore Technology Conference, 29 set. 2025.

SANT'ANA, J.; PALHANO, L.; NARDIN, E. C.; RIBEIRO, C. R. B. Desempenho sustentável do descomissionamento offshore: elementos para o processo de gestão. In: ROG.e 2024 – Congresso Brasileiro de Óleo e Gás. Rio de Janeiro: IBP, 2024. Disponível em: https://biblioteca.ibp.org.br/scripts/bnmapi.exe?router=upload/37883. Acesso em: 29 set. 2025. ISSN 2525-7579.

SHELL U.K. LIMITED. Brent Field Decommissioning – Comparative Assessment Procedure. Technical Report, 2017. Disponível em: https://www.shell.co.uk/about-us/sustainability/decommissioning/brent-field-decommissioning/brent-field-decommissioningprogramme/_jcr_content/root/main/section/simple/text_937683428.multi.stream/1688549308051/14e9687bafecccbbd0a211b8f518c14545018f04/brent-decom-comparative-assessment-procedure-february-2017.pdf . Acesso em: 20 out.2025.

U.S. FISH AND WILDLIFE SERVICE. Decommissioning Information Systems and Information Management and Technology (IMT) Investments. Information Resources and Technology Management, 17 maio 2023. Disponível em: https://www.fws.gov/policy-library/270fw3 . Acesso em: 10 out. 2025.

VIDAL, P. C. J. et al. Conceptual framework for the decommissioning process of offshore oil and gas platforms. Marine Structures, v. 85, p. 103–262, 2022. DOI: 10.1016/j.marstruc.2022.10326.

WATSON, R.; INVERNIZZI, D. C.; AHIAGA-DAGBUI, D. D. A holistic systems approach to sustainable offshore decommissioning. Ocean Engineering, v. 285, p. 116 692, 2023.

WORLD BANK. Towards Sustainable Decommissioning and Closure of Oil Fields and Mines: A Toolkit to Assist Government Agencies. Washington, D.C.: World Bank, 2010. Disponível em: http://siteresources.worldbank.org/EXTOGMC/Resources/336929-1258667423902/decommission_toolkit3_full.pdf . Acesso em: 10 out. 2025.

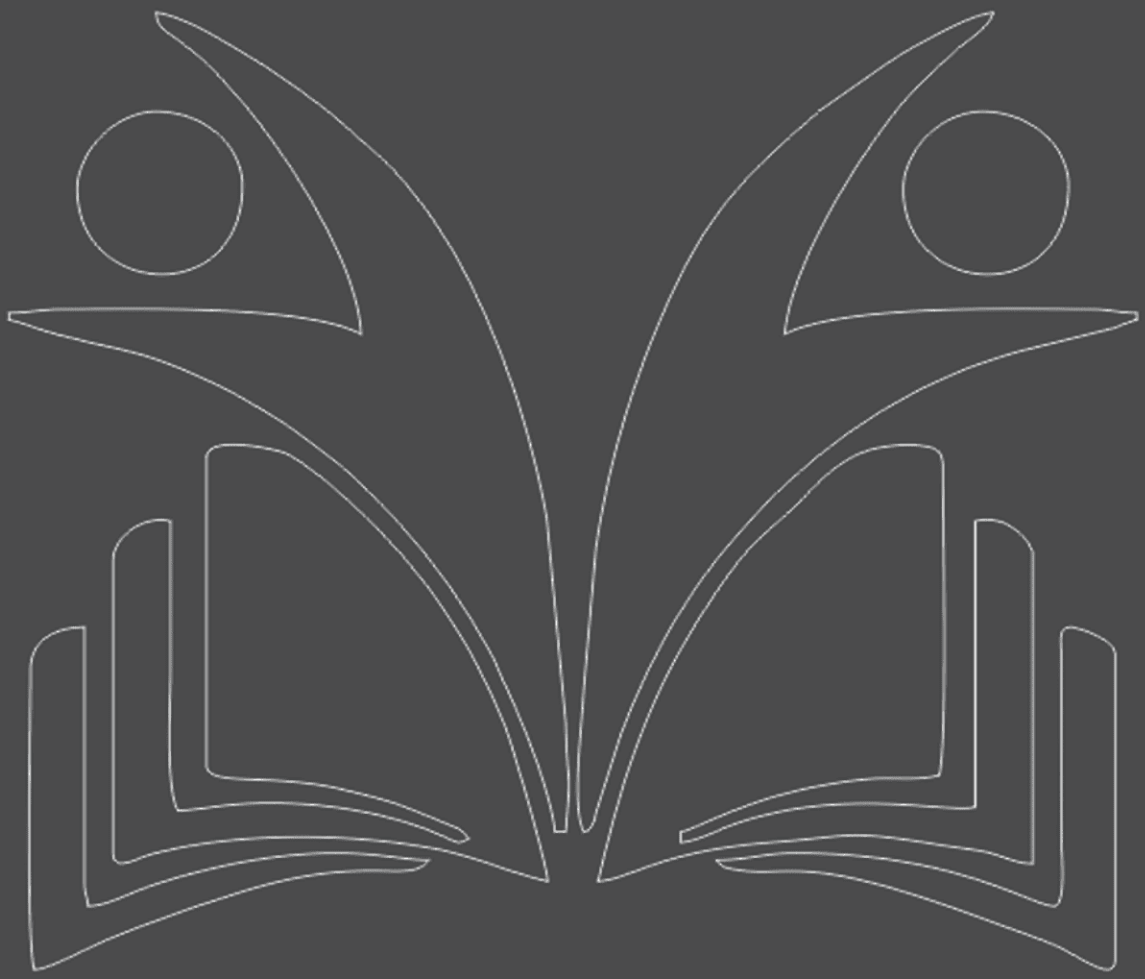
Capítulo 7

10.37423/260911349

MODELOS DE LOGÍSTICA INVERSA Y ECONOMÍA CIRCULAR PARA RESIDUOS ELECTRÓNICOS: REVISIÓN Y DISEÑO DE REDES INVERSAS ENTRE COLOMBIA Y BRASIL

Juan Miguel Castaño

Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo



RESUMEN

El presente estudio analiza el flujo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), una problemática en aumento debido al crecimiento del consumo tecnológico. A través de la planificación y control de la logística inversa bajo un enfoque de economía circular, se busca maximizar la recuperación de valor y reducir los impactos ambientales. El objetivo general consiste en comparar las estrategias de gestión de RAEE entre Brasil y Colombia, identificando sus fortalezas, limitaciones y oportunidades de mejora mutua. La investigación adopta una metodología mixta: un enfoque cualitativo basado en la revisión de literatura y normativa, y un enfoque cuantitativo mediante el análisis de indicadores de generación, recolección y tratamiento. Los resultados muestran que Brasil cuenta con un sistema más consolidado y centralizado, mientras que Colombia avanza en la consolidación de sus programas posconsumo. Ambos países enfrentan desafíos comunes en la educación ambiental, la formalización laboral y la trazabilidad de datos. Finalmente, se propone un modelo de red inversa apoyado en la robótica, la inteligencia artificial y la tecnología blockchain, con el fin de optimizar los procesos de clasificación, recolección y seguimiento de RAEE, fortaleciendo la sostenibilidad y eficiencia operativa en el marco de la economía circular.

Palabras clave: Logística inversa, Residuos electrónicos, Economía circular, Gestión ambiental, Responsabilidad extendida del productor.

1 INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos son de los principales motores del desarrollo humano, pues comparando nuestro estilo de vida actual con cómo vivíamos hace 100 años, hay una diferencia significativa, un proceso impulsado por la innovación tecnológica, impactando positivamente nuestras vidas desde la reducción de problemas de salud, hasta nuestra comodidad individual, donde los dispositivos cada vez se vuelven más asequibles y, por lo tanto, siendo parte de la vida de muchas más personas.

Sin embargo, junto con este acceso masivo a dispositivos electrónicos surge una problemática creciente y es la gestión de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), los equipos descartados tras su vida útil, pues esta basura electrónica contiene tanto materiales valiosos (metales críticos, plásticos de ingeniería) como sustancias peligrosas que, si no se gestionan adecuadamente, pueden provocar impactos severos en la salud pública y el medio ambiente. De hecho, según Lundberg (2025, p. 18-19), desde el año 2014 la generación global de RAEE fue estimada en 41.8 millones de toneladas, de las cuales el 84.44% (35.3 millones de toneladas) no fueron administradas, para el año 2019 estas cifras habían ascendido a 53.6 millones de toneladas generadas, aumentando 11.8 millones producidos en solo cinco años, aun así, solo fueron debidamente reciclados 9.3 millones de toneladas, lo que representa el 17.36%. Esta tendencia tan marcada demuestra el crecimiento exponencial que han tenido no solo el uso de aparatos electrónicos, sino también los residuos generados y su deficiente gestión, las proyecciones generadas por Lundberg (2025, p. 22) estiman que para el año 2040 la producción de dispositivos electrónicos se situará en 142.69 millones de toneladas y durante el mismo periodo de tiempo, los desechos electrónicos habrán ascendido a 103.89 millones de toneladas de las cuales solo serán adecuadamente tratadas 19.48 millones.

Dentro del contexto latinoamericano, el foco de esta investigación lo tienen los países de Brasil y Colombia, los cuales han presentado diversas estrategias para la creación de marcos regulatorios y programas de logística inversa para los RAEE, por ejemplo, en el caso de Brasil, surgieron políticas públicas ambientales como las que señalan Souza, Andriola y Pontes (2025), por ejemplo para la gestión integrada y adecuada de residuos sólidos usando sistemas de logística inversa (Ley n.° 12.305/2010) o al castigar acciones que causen daños ambientales (Ley n.° 9.605/1998), sin embargo, aunque se han dado avances normativos, muchas de estas políticas enfrentan obstáculos significativos, como que los instrumentos legales carecen de implementación práctica o los problemas de fiscalización o participación ciudadana.

En el caso de Colombia igualmente se han tomado acciones normativas para el manejo de residuos, como es el caso de la resolución no. 851 de 2022, que establece la "clasificación nacional de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos - AEE y sus residuos, los lineamientos y requisitos de los sistemas de recolección y gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos - RAEE" (MINISTRO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2022, p. 4), no obstante, pese a toda la estructura política que tiene la resolución, aún presenta muchas dificultades para su cumplimiento; como la infraestructura de recolección y almacenamiento en zonas menos desarrolladas, y la falta de conciencia pública lo que implica la evasión de las normativas establecidas (FABRA; FABRA, 2024). Demostrando que todavía existen barreras de implementación que impiden llevar a cabo un proceso adecuado en la gestión de residuos, como la falta de trazabilidad y la baja eficiencia en los procesos de clasificación y aprovechamiento.

En el ámbito académico, efectivamente existe literatura creciente sobre logística inversa y economía circular en estas áreas, sin embargo, son escasos los estudios que realicen una comparación sistemática entre Brasil y Colombia, donde además se tenga en cuenta la dimensión tecnológica de la ingeniería mecatrónica como una herramienta para la visión organizacional y de procesos de la ingeniería industrial. Este estudio se justifica en llenar ese vacío mediante un análisis comparativo que aporte criterios prácticos para el diseño de redes inversas más eficientes y sostenibles, a la vez que proponga mejoras tecnológicas y de gestión aplicables tanto al ámbito empresarial como al desarrollo de políticas públicas en ambos países. De esta manera, la investigación contribuye no solo al avance académico, sino también a la transición hacia modelos productivos más circulares y responsables en ambas regiones.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Se busca definir conceptos que serán importantes para la comprensión posterior de los datos presentados, además de contextualizar la situación sobre la cual se desarrolla el análisis comparativo.

2.1 Definiciones Clave

2.1.1 RAEE / e-waste

Lundberg (2025) define los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos como dispositivos desechados que han alcanzado el fin de su vida útil y ya no se destinan al reciclaje o reutilización. Este flujo de residuos está en crecimiento y suele contener sustancias como plomo, mercurio, cadmio y arsénico, que representan riesgos severos para la salud humana y los ecosistemas si no se gestionan adecuadamente. Pueden ser clasificados en tres categorías: Línea blanca para los electrodomésticos grandes y pequeños como neveras u hornos, línea marrón para los electrónicos de consumo como equipos de audio y vídeo, y Línea gris para los equipos de telecomunicaciones como computadores o teléfonos (BARTOLO; URBINA, 2015). Según Morales (2022) los RAEE se caracterizan por que la mayoría de dichos residuos se concentran en zonas urbanas debido al mayor consumo, pero también provienen de los grandes sectores empresariales quienes renuevan constantemente las herramientas tecnológicas utilizadas en el desarrollo de sus funciones y servicios.

2.1.2 Logística Inversa

De acuerdo con Rogers y Tibben-Lembke (1998), la logística inversa es el proceso de planificar, implementar y controlar el flujo eficaz y rentable de materias primas, productos en proceso y terminados desde el consumidor hasta el productor, con el fin de recuperar valor o una eliminación adecuada, según Salas-Navarro et al. (2024) es una estrategia cuyo objetivo es el uso adecuado de los recursos, buscando mitigar efectos ambientales, regular procesos de producción y distribución, y generar compromiso por parte de las empresas respecto al uso y disposición final de sus productos. En este sentido, Olano et al. (2024, p. 84) señalan que la logística inversa es “cada vez más relevante en las cadenas de suministro, especialmente en sectores donde se requiere una gestión eficiente de los productos usados y desechados para poder proteger el medio ambiente y cumplir con regulaciones ambientales”. Estos procesos incluyen la inspección, almacenamiento, transporte y transformación de todos aquellos productos recuperados.

2.1.3 Economía Circular

Muy relacionado a la logística inversa se encuentra también el concepto de economía circular, que según Cajo et al. (2024), es un modelo económico en el que se busca conservar útiles los recursos el

mayor tiempo posible, minimizando la generación de residuos a la vez que se maximiza su valor, con énfasis en la reutilización y reciclaje de materiales dentro de los ciclos de producción y consumo. Se presenta como una alternativa más atractiva y viable en el ámbito empresarial que la economía lineal, consistente en "tomar, hacer, tirar". Apoyándose en tres principios básicos: preservar y aumentar el capital natural, optimizar el rendimiento de los recursos y promover la efectividad del sistema; además una economía circular también cuenta con características clave como lo son el compartir los recursos renovables, la reducción de emisiones, la disminución de pérdidas de materiales y residuos, y finalmente mantener el valor de productos, componentes y materiales en la economía (CERDÁ; KHALILOVA, 2016).

2.1.4 Redes Inversas

Mientras la logística inversa se encarga de definir los objetivos y etapas, las redes inversas representan la aplicación práctica de ese proceso, en esencia son aquellos sistemas que gestionan el flujo de productos y materiales desde el punto de consumo hasta el punto de producción, en donde se recuperan, reciclan, redistribuyen o eliminan, algo importante que menciona Fleischmann (2001) es que estas redes no buscan crear redes completamente nuevas, sino adaptarse a la infraestructura logística existente para recuperar el mayor material posible. Existen distintos tipos de redes de logística inversa, clasificados según producto, flujo y responsabilidades, asimismo añade otras dos categorías, siendo el impulsor de la recuperación del producto (si es por un motivo económico o jurídico) y el responsable del proceso de recuperación (si es el fabricante original o un tercero).

2.2 Antecedentes Internacionales

2.2.1 Europa y Asia

En el caso de la Unión Europea, Vargas (2017) señala que se formaron los Sistemas de Responsabilidad del Productor, encargados de financiar y supervisar sistemas de recolección, surgiendo así los sistemas "Take-Back", donde se obliga a inventariar los RAEE y definición de productor, quienes deben recolectar los artefactos usados para ser separados, tratados o reciclados al asumir responsabilidades físicas y financieras para los consumidores. De manera similar, países asiáticos han tomado acción en este proceso, Bartolo y Urbina (2015) exponen como China, es de los países con mayor crecimiento de RAEE en los últimos años, pero lo han combatido al distribuir responsabilidades entre diversas agencias

gubernamentales, como el gobierno nacional (con sus diversos ministerios), productores, recolectores formales e informales y consumidores. India por su lado también ha implementado proyectos reglamentarios que establecen responsabilidades para el Ministerio de Medio Ambiente, productores, centros de recolección y consumidores, aunque el sector informal mantiene una presencia permanente en el medio.

2.2.2 Norteamérica y Latinoamérica

Dentro del continente americano, en Estados Unidos se desarrolló un trabajo llamado "Designing an Effective Electronics Recycling Program: Lessons Learned from Existing Programs", donde veintitrés estados implementaron normas legales frente a la responsabilidad extendida del productor, obligando a desarrollar programas de recolección y reciclaje, incrementando así los RAEE tratados de 470.000t a 650.000t entre el 2006 y 2010, involucrando a su vez fabricantes, comercializadores y al gobierno (VARGAS, 2017). En contraste, en Latinoamérica las medidas tomadas para la gestión de RAEE han sido menos eficientes, como es el caso de Argentina, que pese a existir leyes como la Ley Nº2807 encargadas de definir y clasificar los RAEE o la Ley N°25916 para la Gestión Integral de Residuos, carecen de leyes específicas sobre su manejo (FAMÁ, 2019), o el caso de México, donde "El marco legislativo y las políticas públicas nacionales para regular la gestión de los RAEE en México se encuentran señalados de una manera ambigua, y con poca certeza" (VÁZQUEZ, 2025, p. 30), lo que evidencia limitaciones estructurales en la planeación y ejecución de políticas en la región.

2.2.3 Comparación general

Queda evidenciado que a nivel global la generación de RAEE es una preocupación alarmante, pues respecto a cada continente, Asia produce 24.9 Megatoneladas (Mt), América 13.1, Europa 12 Mt, África 2.9 Mt y Oceanía 0.7 Mt, ante esta problemática, se han tomado distintas medidas para gestionar correctamente los RAEE, desde la implementación y adaptación de legislaciones, hasta el desarrollo de sistemas de gestión y recolección de residuos, lo que ha llevado a que para el 2019 el 71% de la población mundial se encuentre bajo una política nacional de desechos electrónicos (ADRIAN et al., 2020, p. 25-26), sin embargo, en ciertos contextos geográficos y debido a diversas cuestiones socioculturales, resulta difícil llevar a cabo efectivamente cada propuesta y es necesario reforzar la importancia de esta situación, con el fin de que tanto personas como entidades públicas y privadas se comprometan con el manejo adecuado de estos residuos.

2.3 Contexto normativo y práctico en Brasil y Colombia

2.3.1 Acciones tomadas en Brasil

En Brasil existe un amplio marco normativo respecto al tema de la conciencia ambiental, con énfasis en la protección de áreas de interés biológico y en sancionar acciones que las afecten, especialmente la ley nº 12.305/10 que implementó la Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS), una política brasilera que establece conceptos, principios e instrumentos para la gestión integrada de residuos sólidos, por medio de sistemas de logística inversa que permitan el retorno de los productos posconsumo al sector productivo, además de incentivar la participación de recolectores de materiales reciclables, apuntando a objetivos como la reducción de la contaminación y el desperdicio de materiales. Aún con todo esto, su implementación enfrenta desafíos, entre ellos los costos logísticos, la baja participación ciudadana y la falta de información, revelando la urgencia de políticas más sólidas y fortalecimiento de la educación ambiental, sumado a la necesidad de infraestructura adecuada y la formalización de asociaciones recolectoras (SOUZA; ANDRIOLA; PONTES, 2025).

2.3.2 Acciones tomadas en Colombia

Según Camacho y Escobar (2020), Colombia es de los pocos países de Latinoamérica con un marco regulatorio enfocado en los RAEE, pues el Congreso de la República expidió la Ley 1672, la cual establece los lineamientos para una política pública de gestión integral de RAEE (COLOMBIA, 2013), aplicando el principio de la responsabilidad extendida del productor y desarrollando obligaciones para el gobierno nacional. La gestión de los RAEE en Colombia se ha abordado desde dos sectores sociales, el primero son los recolectores informales, conformado por personas de escasos recursos quienes se encargan de su recolección y comercialización, con el problema de separar componentes manualmente, dejando residuos y comprometiendo su integridad personal, por otro lado, el sector formal, conformado por empresas establecidas, quienes garantizan un adecuado manejo y disposición final de los residuos, exportando componentes peligrosos a plantas especializadas en el exterior (BARTOLO; URBINA, 2015), de todas formas, la alta presencia del sector informal, además de problemas de costos e infraestructura todavía dificultan una gestión completamente eficiente de RAEE en el país.

2.4 Necesidad del Estudio

Con base en toda la información presentada anteriormente, queda en evidencia la importancia que tiene la correcta gestión de los RAEE, pues es una problemática creciente a nivel global, aun así existen diversas estrategias que pueden llevarse a cabo desde el ámbito legislativo promoviendo la responsabilidad extendida del productor, hasta la propia labor ciudadana y la conciencia del consumidor; sin embargo, es un proceso lento, donde la falta de información y estrategias asertivas llevan a dificultades de ejecución, sobre todo en países de América Latina, por ello surge la necesidad de este estudio, el poder realizar una comparación sistemática entre dos países con gran responsabilidad ambiental como Brasil y Colombia, con el fin de evaluar las acciones tomadas por cada uno y proponer mejoras mutuas para la gestión de estos residuos.

3 MÉTODO

3.1 Enfoque y diseño

El presente estudio maneja un enfoque mixto, combinando el análisis cuantitativo y cualitativo, a fin de abordar todas las dimensiones del tema investigado, llevando simultáneamente la observación y evaluación de fenómenos. El diseño corresponde a una revisión bibliográfica sistemática y comparativa, para identificar, seleccionar y analizar investigaciones y documentos técnicos, relacionados con la pregunta de investigación. Mediante esta metodología, se puede analizar integralmente avances y limitaciones en la gestión de RAEE en Brasil y Colombia.

3.2 Problema, preguntas y objetivos

Ante la escasez de estudios comparativos sobre la gestión de RAEE entre Brasil y Colombia que integren adecuadamente las dimensiones sociopolíticas y tecnológicas, se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles son las principales diferencias y similitudes entre las estrategias de gestión de RAEE en Brasil y Colombia bajo los enfoques de la logística inversa y la economía circular?

En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo general comparar las estrategias de gestión de RAEE entre Brasil y Colombia, identificando fortalezas, limitaciones y oportunidades de mejora mutua.

Los objetivos específicos son:

1. Identificar y comparar los marcos normativos de ambos países respecto al cuidado ambiental derivado de los RAEE.

2. Organizar sistemáticamente la información relacionada con la logística inversa y la economía circular en ambos contextos.

3. Analizar las acciones y estrategias implementadas en ambos países para el manejo adecuado de los RAEE.

4. Analizar las limitaciones de desarrollo y determinar qué aspectos positivos pueden implementarse en ambas regiones.

3.3 Fuentes y estrategias de búsqueda

Para la búsqueda de información relevante fueron empleadas bases de datos como Google Scholar, o SciELO, pues son motores especializados en la búsqueda de documentos científicos de un gran número de disciplinas y fuentes, destacando el contenido en artículos científicos, tesis, patentes, o libros; garantizando así la confiabilidad de los resultados y la rigurosidad de los estudios. Para la búsqueda de la información en distintos idiomas se utilizaron los operadores booleanos.

3.4 Criterios de inclusión/exclusión

Con el fin de garantizar un análisis comparativo coherente se optó por definir criterios de inclusión y exclusión, encargados de filtrar la selección de fuentes bibliográficas, normativas y estadísticas.

Los criterios de inclusión seleccionados fueron:

- Relevancia temática: Estudios o informes que traten la gestión de RAEE, logística inversa y/o economía circular.

- Tipo de documento: Artículos científicos, tesis, informes gubernamentales, normativas oficiales, planes nacionales de gestión o publicaciones de organismos multilaterales.

- Periodo de publicación: Entre el 2010 y el 2025 para fuentes aplicadas y resultados, y sin límite temporal para referencias teóricas o conceptuales.

- Idioma: Español, inglés y portugués.

- Accesibilidad: Documentos con texto completo disponibles en bases académicas.

- Credibilidad: Publicaciones respaldadas, publicadas o citadas por instituciones reconocidas.

Los documentos que no cumplieron con las condiciones anteriores, ya sea por falta de relación directa con la gestión de RAEE, ausencia de respaldo institucional, o por ubicarse fuera del periodo y contexto de estudio, fueron excluidos del análisis.

3.5 Proceso de selección (PRISMA)

El proceso de selección de fuentes se realizó en varias etapas, adaptando el modelo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Para mejorar la calidad de las revisiones sistemáticas y garantizar la calidad de la investigación con el fin de asegurar transparencia y coherencia en la información obtenida.

Etapas del modelo:

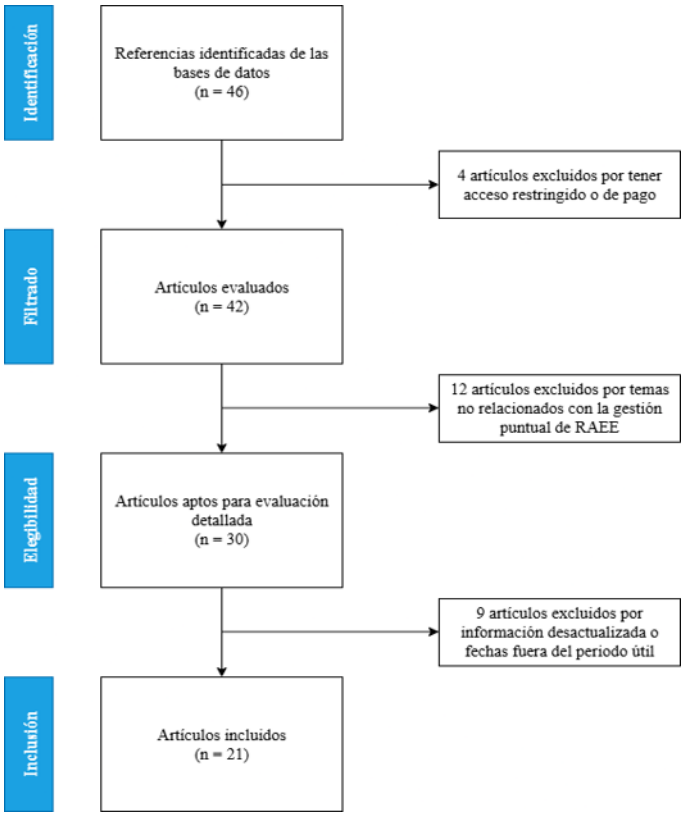
1. Identificación: Búsqueda inicial en bases académicas (SciELO, Google Scholar) y fuentes institucionales.

2. Filtrado preliminar: Eliminación de duplicados, títulos no pertinentes o documentos sin texto completo.

3. Evaluación de elegibilidad: Lectura de resúmenes e introducciones para confirmar el cumplimiento de los criterios de inclusión.

4. Inclusión final: Fuentes seleccionadas para el análisis comparativo.

Figura 1 – Diagrama de flujo del proceso de selección de fuentes.



Fuente: Adaptado de PRISMA (2020), elaboración propia (2025).

3.6 Parámetros de análisis

Con el fin de realizar un análisis comparativo equilibrado entre Brasil y Colombia, se definieron dos grupos de parámetros complementarios: cuantitativos y cualitativos, orientados a evaluar la efectividad de la gestión de RAEE desde los enfoques de la logística inversa y la economía circular.

Los parámetros cuantitativos permiten medir la inversión realizada y su consecuencia en el desempeño. Considerando tanto los valores absolutos como relativos, a fin de comparar no solo el volumen total de residuos tratados, sino también la eficiencia del proceso en relación con la cantidad de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) introducidos al mercado. Los indicadores definidos fueron:

- Cantidad total de AEE generados (Millones de kg).
- Cantidad de AEE generados per cápita (kg por habitante al año).
- Cantidad total de RAEE generados (Millones de kg).
- Cantidad de RAEE generados per cápita (kg por habitante al año).

- Volumen de RAEE recolectado, tratado y reciclado (Millones de kg).
- Tasa de recolección (%) respecto al total de RAEE generado.
- Número de sistemas de recolección autorizados o en funcionamiento.
- Cobertura territorial.
- Inversión económica en la gestión de RAEE.

Los parámetros cualitativos, por su parte, permiten examinar las dimensiones legales, temporales, educativas, institucionales, evaluativas y sociales que no pueden expresarse únicamente en valores numéricos. Gracias a los indicadores se analiza la solidez del marco regulatorio, el grado de articulación entre actores públicos y privados, la presencia de políticas de educación ambiental y las estrategias de economía circular en cada país. Los parámetros definidos fueron:

- Existencia y alcance de la legislación nacional.
- Año de inicio de la gestión formal de RAEE.
- Programas de educación y sensibilización ciudadana.
- Mecanismos de articulación con universidades, empresas o actores comunitarios.
- Procesos de sistematización y evaluación de resultados.
- Impacto social (empleos verdes, participación ciudadana).

3.7 Marco comparativo

El marco comparativo se construyó a partir de los parámetros definidos en el apartado anterior, organizados en una matriz que permite evaluar el desempeño de Brasil y Colombia en sus seis dimensiones. La comparación se desarrollará mediante la interpretación y análisis conjunto de los parámetros cuantitativos y cualitativos, de modo que los resultados numéricos puedan ser aplicados al contexto institucional y socioeconómico de cada país. Esta estructura analítica permitirá identificar fortalezas, oportunidades de mejora y posibles lineamientos de integración regional en materia de logística inversa y economía circular, todos ellos presentados en los resultados.

3.8 Consideraciones éticas

El estudio se realizó considerando los principios de integridad académica y ética investigativa. Toda la información analizada proviene de fuentes institucionales, normativas o científicas disponibles en bases de datos públicas y oficiales, garantizando la trazabilidad y verificabilidad de los datos empleados. Se respetaron los derechos de autor mediante la citación completa y precisa de las fuentes conforme a la norma ABNT, evitando cualquier tipo de plagio o uso indebido de información. El análisis comparativo se efectuó de forma objetiva, sin manipulación ni sesgo interpretativo, con el propósito de mantener la fidelidad a la evidencia consultada.

4 RESULTADOS

4.1 Panorama general de la gestión de RAEE en Brasil y Colombia

Brasil posee un marco normativo bastante amplio y sólido, empezando por la Ley n.° 12.305 / 2010 — La PNRS—, que instituyó la gestión integrada y adecuada de residuos sólidos mediante la implementación de sistemas de logística reversa. Posteriormente, la Resolución CONAMA n.º 452 de 2012, emitida por el Consejo Nacional do Meio Ambiente, estableció criterios para el descarte y manejo de residuos especiales, imponiendo obligaciones de etiquetado sobre los riesgos y destino de los residuos. Se consolida el principio de responsabilidad extendida del productor y del consumidor al regular la logística reversa de productos electrónicos a través del Decreto n.° 10.240 / 2020 (SOUZA; ANDRIOLA; PONTES, 2025). Más recientemente, la PNRS fue actualizada por el Decreto n.º 10.936 de 2022, que amplió la efectividad de la logística reversa y definió mecanismos más precisos para su monitoreo, incorporando metas y herramientas digitales de registro (OLIVEIRA et al., 2025).

Colombia presenta igualmente una trayectoria normativa relevante en la gestión de RAEE. Empezando por la Ley 1672 del 2013, que “establece los lineamientos para la política pública de gestión integral de los RAEE generados en el territorio nacional” (COLOMBIA, 2013, p. 1), constituyendo la base legal que los reconoce como residuo de manejo diferenciado. Ganando rigurosidad gracias al Decreto 284 del 2018 donde se reglamenta la gestión integral de RAEE, a fin de prevenir y minimizar impactos ambientales (PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA, 2018), posteriormente las Resoluciones 480 de 2020 y 851 de 2022 desarrollaron los instrumentos técnicos y operativos, hasta el aporte más reciente de la Resolución 479 del 2023, actualizando parcialmente la resolución anterior, consolidando así el marco nacional de recolección y gestión integral de RAEE.

4.2 Resultados cuantitativos: desempeño operativo y económico

Con el fin de representar de manera sistemática los parámetros analizados, se elaboró una tabla que presenta el indicador correspondiente, la unidad de medida empleada, los valores obtenidos para cada país y la fuente o nota metodológica respectiva. Los parámetros no incluidos en la tabla se abordan posteriormente en el texto, con un análisis complementario.

Tabla 1 — Análisis comparativo cuantitativo

Indicador	Unidad	Brasil	Colombia	Fuente / Nota metodológica
AEE generados en total	Millones de kg	3210	576	The Global E-waste Statistics Partnership (2022)
AEE generados per cápita	kg hab^{-1} $año^{-1}$	14.9	10.2	The Global E-waste Statistics Partnership (2022)
RAEE generados en total	Millones de kg	2443	388	The Global E-waste Monitor (2024)
RAEE generados per cápita	kg hab^{-1} $año^{-1}$	11.4	7.5	The Global E-waste Monitor (2024)
Volumen de RAEE recolectado	Millones de kg	79	4.9	The Global E-waste Monitor (2024)
Tasa de recolección	%	3.23	1.26	Cálculos propios
Entidades gestoras colectivas	Unidades	2	4	SINIR (2024); CASTILLO (2019)

Nota: La tasa de recolección se calculó como (RAEE tratados / RAEE generados) × 100. Valores aproximados, redondeados a dos cifras decimales.

Fuente: Elaboración propia (2025).

Como era de esperarse, debido a su mayor población y extensión territorial, Brasil genera una cantidad considerablemente superior de AEE (considerando que dichos datos corresponden al 2022, es previsible que hayan aumentado para el 2024) y, en consecuencia, de RAEE, tanto en valores absolutos como per cápita. Sin embargo, en ambos países el volumen efectivamente tratado representa una proporción mínima respecto al total generado: menos del 4% en Brasil y menos del 2% en Colombia. Este último, a pesar de contar con un número mayor de entidades gestoras, presenta una eficiencia de

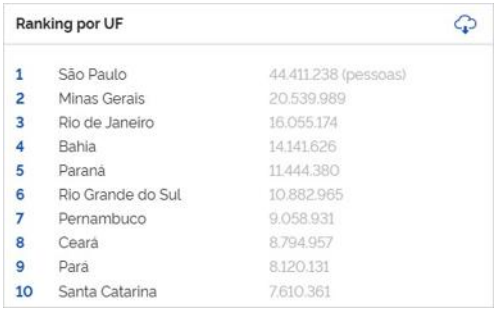
recolección aún más baja, lo que evidencia las limitaciones operativas y logísticas compartidas por ambos sistemas.

Al analizar los sistemas de recolección autorizados para el tratamiento y manejo de RAEE, Brasil cuenta con trece entidades gestoras habilitadas por el Ministerio de Medio Ambiente (SINIR, 2024), correspondientes a diversos flujos de residuos posconsumo, como envases, vidrios, aceites y plásticos. No obstante, únicamente dos de ellas — ABREE y Green Eletron— están dedicadas específicamente a la gestión de RAEE, coordinando sus actividades de recolección, transporte y reciclaje a nivel nacional. Ambas articulan a más de 130 empresas adherentes, consolidándose como los principales instrumentos de la política de logística inversa para este flujo de residuos (GREEN ELETRON, 2023).

En Colombia, en cambio, el sistema opera mediante los Sistemas de Recolección y Gestión (SRyG) los cuales pueden ser individuales, cuando cada productor es responsable de su propio sistema de recolección; o colectivos, cuando varios productores se agrupan para operar un único sistema. Estos sistemas posconsumo son autorizados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) (FABRA; FABRA, 2024). El país cuenta siete programas impulsados por la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) para la gestión de residuos posconsumo, de los cuales tres se enfocan directamente en la gestión de RAEE: Pilas con al ambiente (sistema para el aprovechamiento de pilas), EcoCómputo (colectivo de empresas dedicadas a la gestión integral de RAEE) y Red Verde (programa de disposición final de electrodomésticos). Adicionalmente, el programa Lúmina (sistema para el aprovechamiento de residuos de iluminación) es relevante en este flujo, mas no hace parte de la ANDI (CASTILLO, 2019). Aunque cada sistema tiene objetivos y alcances diferentes, en conjunto se complementan dentro de la cadena de gestión de los RAEE en el territorio nacional.

Analizando la cobertura territorial de los sistemas gestores en Brasil, de acuerdo con el Relatório Anual Green Eletron (2023), el sistema de logística reversa operó en 306 municipios de los 5570 distribuidos en todos los estados del país. Aunque esto representa solo el 5.5% del total de municipios brasileros, dichos territorios incluyen las principales capitales y áreas metropolitanas, por lo que se estima que el sistema cubre aproximadamente entre el 55% y el 60% de la población nacional según cifras del IBGE (2022).

Figura 2 — Distribución poblacional en el territorio de Brasil.

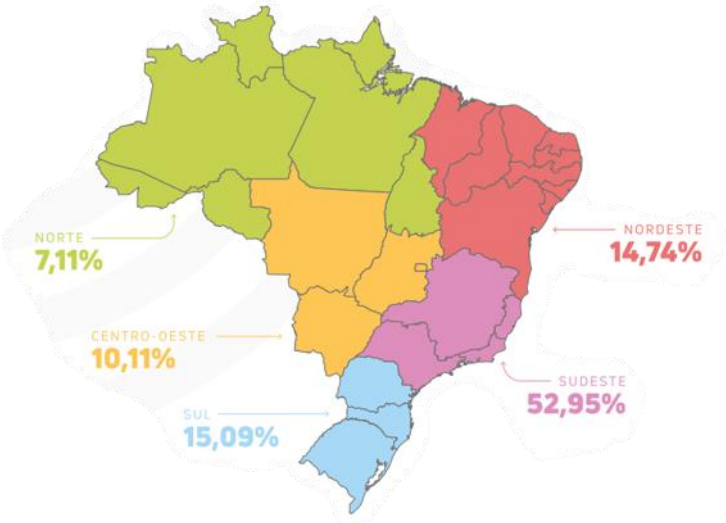


Ranking por UF		
1	São Paulo	44.411.238 (pessoas)
2	Minas Gerais	20.539.989
3	Rio de Janeiro	16.055.174
4	Bahia	14.141.626
5	Paraná	11.444.380
6	Rio Grande do Sul	10.882.965
7	Pernambuco	9.058.931
8	Ceará	8.794.957
9	Pará	8.120.131
10	Santa Catarina	7.610.361

Fuente: Adaptado de IBGE (2022).

La Figura 3 muestra la distribución regional de los residuos recolectados, evidenciando que más del 50% proviene de la región Sudeste, la más densamente poblada y con mayor infraestructura urbana, lo que confirma la concentración operativa del sistema en áreas metropolitanas.

Figura 3 – Distribución porcentual de residuos electrónicos recolectados por región en Brasil (2023).

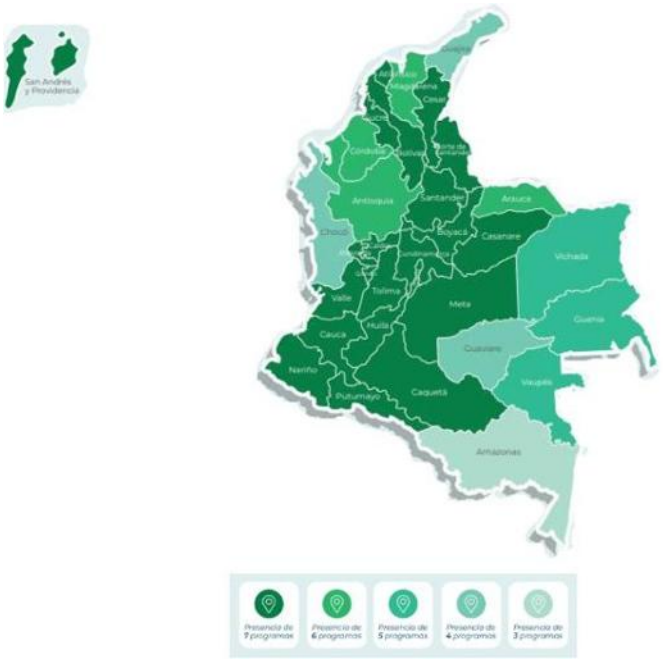


Fuente: Relatório Anual de Resultados — Green Eletron (2023).

En Colombia ocurre una situación similar, donde los SRyG concentran su operación en zonas urbanas principales, garantizando mayor alcance poblacional que territorial. Cada uno de los treinta y dos departamentos del país cuenta con la presencia de al menos tres de los siete programas de la ANDI y, en cuanto a los enfocados específicamente en RAEE, Pilas con el Ambiente tiene presencia en los treinta y dos departamentos, EcoCómputo en treinta y Red Verde en veintisiete.

La Figura 4 muestra la distribución territorial de los programas posconsumo de la ANDI, evidenciando que los departamentos con mayor número de programas coinciden con los de mayor población y desarrollo urbano, lo que confirma la concentración operativa de los sistemas en áreas metropolitanas.

Figura 4 — Cobertura nacional de los programas de la ANDI (2023).



Fuente: Espinosa y Rodríguez (2024).

Frente a la inversión pública destinada a la promoción de proyectos de desarrollo sostenible y conservación ambiental en Brasil, según el Portal da Transparência (2024), se destinaron R$3.816.393,00, equivalentes a aproximadamente 700.000 USD. Aun así, esta cantidad no representa el total destinado al manejo específico de RAEE, sino al conjunto de proyectos de gestión ambiental desarrollados en el país. En cuanto a los costos e inversiones de los sistemas privados de logística reversa, como Green Eletron o ABREE, estos son considerados información confidencial y, por tanto, no se encuentran disponibles para consulta pública (GREEN ELETRON, 2023).

Respecto a la inversión pública en el manejo de RAEE en Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible informó que:

> Durante 2024, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible invirtió $ 104.706.667,00 [aproximadamente 26.726 USD] para la realización de las actividades descritas en este informe, sin embargo, es importante señalar que esta cifra no corresponde con la totalidad de las inversiones relacionadas para la ejecución de la política puesto que diferentes entidades públicas y privadas concurren en la implementación del plan de acción de la Política de Nacional para la Gestión Integral de RAEE (MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2024, p. 40).

Esto demuestra que, aunque la inversión general destinada al cumplimiento de políticas públicas ambientales ha sido significativa tanto en Brasil como en Colombia, aún no se dispone de un presupuesto claramente definido para la gestión específica de los RAEE ni otros flujos de residuos

sólidos. En consecuencia, solo una fracción del gasto ambiental total se orienta de manera directa a esta problemática.

4.3 Resultados cualitativos: aspectos normativos, institucionales y sociales

Para representar de manera sistemática los parámetros analizados, se elaboró una tabla que presenta el indicador correspondiente, los resultados de cada país y la fuente o nota metodológica respectiva. Los parámetros no incluidos en la tabla se abordan posteriormente en el texto, con un análisis complementario.

Tabla 2 — Análisis comparativo cualitativo

Indicador	Brasil	Colombia	Fuente / Nota metodológica
Legislación, regulación o política nacional para gestión de RAEE	Sí	Sí	SOUZA; ANDRIOLA; PONTES (2025); OLIVEIRA et al. (2025); COLOMBIA (2013); COLOMBIA (2018)
Año de inicio de la gestión formal de RAEE	2010 (Lei nº 12.305/2010)	2013 (Ley 1672/2013)	SOUZA; ANDRIOLA; PONTES (2025); COLOMBIA (1993); COLOMBIA (2013)
Programas de educación y sensibilización ciudadana	Sí	Sí	Green Eletron (2025); BRASIL (2025); SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE (2025)
Articulación con universidades, empresas o actores comunitarios	Sí	Sí	SANDALLA (2019); ROYS (2024)

Procesos de sistematización y evaluación de resultados	Sí (SINIR, Green Eletron, ABREE)	Sí (MinAmbiente , ANDI, SIAC)	BRASIL (2024); COLOMBIA (2024)

Fuente: Elaboración propia (2025).

Como se mencionó previamente en el apartado 4.1, tanto Brasil como Colombia cuentan con un amplio marco normativo que define y clasifica los RAEE, estableciendo mecanismos adecuados para su gestión y tratamiento.

En cuanto al origen de las políticas destinadas al manejo de RAEE, Souza, Andriola y Pontes (2025) señalan que en Brasil el proceso de concientización ambiental se inicia con la Política Nacional do Meio Ambiente (Lei n° 6.938/1981), la cual sentó las bases para la preservación, mejora y recuperación de la calidad ambiental. Sin embargo, no fue sino hasta la promulgación de la PNRS (Lei n° 12.305/2010) que se incorporaron formalmente los residuos eléctricos y electrónicos dentro del marco de la logística reversa y la responsabilidad compartida por el ciclo de vida del producto.

En Colombia, de manera similar, la Ley 99 de 1993 estableció los fundamentos de la política ambiental nacional y la responsabilidad de los productores sobre la gestión ambiental de sus productos (COLOMBIA, 1993). No obstante, la Ley 1672 de 2013 fue la primera norma en definir específicamente los RAEE y fijar los lineamientos para su gestión integral, marcando el inicio formal de la política pública en esta materia. Así, puede afirmarse que ambos países han desarrollado sus estrategias en periodos similares, aunque Brasil presenta un recorrido más prolongado en la consolidación de instrumentos y mecanismos de gestión ambiental.

En relación con la educación y sensibilización ciudadana, Brasil ha impulsado diversas campañas orientadas a promover la disposición responsable de los RAEE. En el ámbito privado, Green Eletron (2025) lideró la campaña “Eletrônico não é lixo”, destinada a concienciar a la población sobre la importancia del reciclaje de aparatos electrónicos, pilas y baterías portátiles. A nivel gubernamental, destaca la implementación de la Estratégia Nacional de Educação Ambiental e Comunicação Social na Gestão de Resíduos Sólidos (Educares), promovida por el Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima para fortalecer la aplicación de la PNRS (BRASIL, 2025).

En Colombia, también se han desarrollado múltiples iniciativas para fomentar la correcta disposición de los residuos electrónicos. El programa Red Verde promueve la recolección de electrodomésticos de línea blanca, separando sus componentes para su aprovechamiento o disposición final. Asimismo, la campaña “Ecolecta”, implementada por la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, busca incentivar la participación ciudadana en la recolección responsable de aparatos eléctricos y electrónicos de origen residencial (SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE, 2025).

En Brasil, la articulación institucional entre el sector público, privado y académico se consolida a través de acuerdos y programas conjuntos, como indica Sadalla (2019) en su estudio sobre la gestión de RAEE en la USP, UFSCar y UNICAMP, quien menciona que su gestión a nivel educativo se centra en Universidades Federales, todas reguladas por la Ley n° 8.666 que establece las bases de licitación y contratos de administración pública de 1993 y los Decretos 99.658/90 y 9.373/18 en los que se explican los trámites y posibilidades de destino de los bienes enajenados. Además, la mayor parte de los RAEE de las empresas federales se almacenan en los campus mientras se decide qué destino recibirán.

En Colombia, las propias universidades han realizado trabajos para la gestión de residuos sólidos, como es el caso de la universidad ICESI en Cali, donde en el 2013 dos estudiantes realizaron un diagnóstico general sobre el estado de la universidad en el manejo de RAEE, estableciendo estrategias de mejoramiento para darle total cumplimiento a lo exigido por la ley, contribuyendo con el plan de gestión ambiental. También está el caso de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, donde en 2014 se realizó un trabajo a fin de reducir el volumen de RAEE en la universidad, utilizando estrategias ambientales y económicamente adecuadas alineadas con la Política de Responsabilidad Ecológica y Ambiental (ROYS, 2024).

Los procesos de sistematización y evaluación de resultados permiten analizar como los países recolectan, procesan y comunican la información relacionada al manejo de RAEE, valorando su grado de transparencia institucional y su capacidad para administrar datos de manera eficiente.

En el caso de Brasil, estos procesos se realizan de manera centralizada a través del Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Residuos Sólidos (SINIR), que publica reportes nacionales anuales con indicadores específicos para RAEE. Entidades gestoras como Green Eletron y ABREE complementan esta información mediante informes de desempeño que detallan volúmenes recolectados, puntos de entrega y resultados ambientales. Además, la trazabilidad se refuerza gracias a plataformas digitales y reportes públicos, como el Portal da Transparência (BRASIL, 2024).

En Colombia, el proceso de sistematización presenta un carácter más fragmentado. Si bien el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible recopila información de los programas posconsumo y reporta avances a través del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC), aún persisten brechas en la integración de datos entre regiones y operadores (MINAMBIENTE, 2024). Adicionalmente, los programas posconsumo coordinados por la ANDI publican sus resultados de forma independiente, lo cual limita la consolidación de una base nacional unificada.

Al analizar el impacto social generado por los sistemas de gestión de RAEE, en Brasil se observa que los programas de logística reversa han tenido efectos positivos al ampliar el acceso ciudadano a los puntos de entrega voluntaria y promover la educación ambiental. Según Green Eletron (2023), se instalaron 1.282 puntos de recolección (PEVs) distribuidos en todos los estados del país, facilitando la participación comunitaria en el descarte responsable de residuos electrónicos. A través de campañas como “Eletrônico não é lixo”, se ha fortalecido la sensibilización ambiental y el compromiso ciudadano. No obstante, persisten importantes desafíos relacionados con el desconocimiento público sobre el reciclaje de residuos electrónicos. Un estudio realizado por Green Eletron en 2022 reveló:

> El 75% de los encuestados desconoce que todos los dispositivos electrónicos pueden reciclarse si se desechan correctamente. Esta falta de conocimiento sobre qué constituyen los residuos electrónicos y cómo desecharlos correctamente contribuye a prácticas de eliminación inadecuadas, relegando a los ciudadanos, en este caso, a la condición de contaminadores (ALMEIDA et al., 2024, p. 202, [traducción propia]).

Por su parte, en Colombia, según Espinosa y Rodríguez (2024), se ha evidenciado un aumento de la participación ciudadana, con un mayor número de personas que han utilizado los programas posconsumo al menos una vez; sin embargo, el nivel de participación sigue siendo bajo por la falta de conocimiento sobre estas iniciativas. La implementación de estos programas ha impulsado la creación de empleos en los sectores de reciclaje y gestión de residuos, fomentando oportunidades laborales en la economía circular. En Bogotá, se generaron cerca de 1.200 empleos asociados a la recolección y procesamiento de residuos, aunque la mayoría son informales, lo que plantea desafíos de estabilidad y condiciones laborales. Asimismo, los programas posconsumo han contribuido al fortalecimiento de la conciencia ambiental, aunque aún se requiere mayor difusión y educación en todos los sectores de la población.

5 DISCUSIONES

El análisis comparativo entre Brasil y Colombia evidencia que, aunque ambos países han avanzado en la gestión de RAEE, presentan diferentes niveles de consolidación institucional y operativa. Los resultados reflejan que Brasil posee un sistema más maduro, sustentado en una estructura normativa temprana y robusta, mientras que Colombia avanza progresivamente en la consolidación de su modelo a partir de marcos legales más recientes. La implementación de la PNRS (Lei nº 12.305/2010) en Brasil y la Ley 1672 de 2013 en Colombia marcaron los puntos de partida formales de ambos sistemas, pero la antigüedad y la continuidad de la legislación brasilera han permitido una mayor institucionalización de la logística inversa y una gestión más centralizada de la información.

Los hallazgos confirman lo señalado por Souza, Andriola y Pontes (2025), quienes afirman que la madurez de los sistemas de gestión de RAEE depende de la capacidad de articulación entre los sectores público, privado y académico. En Brasil, entidades gestoras como Green Eletron y ABREE actúan como pilares operativos del sistema, consolidando alianzas con fabricantes, distribuidores y gobiernos locales, además de promover campañas masivas de educación ambiental. En Colombia, la ANDI lidera la coordinación de programas posconsumo como EcoCómputo, Red Verde y Pilas con el Ambiente, los cuales han contribuido a aumentar la recolección y sensibilización ciudadana, aunque persisten dificultades en la consolidación de datos nacionales.

En el plano operativo, los datos analizados evidencian una brecha notable entre el volumen de AEE en el mercado y los residuos efectivamente recolectados y tratados en ambos países. Según el Global E-waste Monitor (2024), Brasil generó más de 2,4 millones de toneladas de RAEE en 2024, con tasas de recolección cercanas al 3%, mientras que Colombia generó aproximadamente 380 millones de kilogramos, alcanzando una tasa de recuperación solo superior al 1%. Estas cifras reflejan que, a pesar del crecimiento en la infraestructura de recolección y en los programas posconsumo, la mayoría de los residuos electrónicos aún no ingresan a los canales formales de gestión.

La diferencia en volumen absoluto se explica por la escala industrial brasilera, pero ambos países comparten el mismo desafío estructural: aumentar la capacidad de captación y trazabilidad de los RAEE frente al rápido incremento del consumo de equipos electrónicos.

Desde el punto de vista social, ambos países enfrentan desafíos comunes relacionados con la participación ciudadana y la formalización del trabajo en el sector de reciclaje. En Brasil, pese al crecimiento de campañas educativas, gran parte de la población aún desconoce qué dispositivos

electrónicos pueden reciclarse correctamente, lo que limita la efectividad de la logística reversa (ALMEIDA et al., 2024). En Colombia, aunque se evidencia un aumento de empleos verdes y de acciones de sensibilización, la informalidad laboral y la escasa difusión educativa continúan afectando la sostenibilidad social del sistema.

En conjunto, los resultados sugieren que tanto Brasil como Colombia transitan hacia modelos de economía circular, pero requieren fortalecer la trazabilidad tecnológica, la cooperación interinstitucional y la educación ambiental. Estos aspectos representan oportunidades para el desarrollo de nuevos modelos de logística inversa, integrando enfoques de la ingeniería industrial y mecatrónica que optimicen la operatividad y la sostenibilidad del ciclo de vida de los RAEE.

6 CONSIDERACIONES FINALES

El análisis comparativo realizado permite reconocer avances significativos y desafíos persistentes en la gestión de RAEE tanto en Brasil como en Colombia. En este contexto, se identifican oportunidades para integrar enfoques tecnológicos desde la ingeniería industrial y la mecatrónica que potencien la trazabilidad, la automatización y la eficiencia logística dentro de los sistemas de recolección y tratamiento.

A partir de estos hallazgos, y considerando los métodos propuestos por Salazar y Rico (2024) para la evaluación de tecnologías emergentes, se plantea el uso de robótica avanzada y brazos manipuladores en las industrias dedicadas al tratamiento de RAEE.

Estas herramientas permitirían clasificar y desmontar componentes con mayor precisión, incrementando la eficiencia en la separación de materiales y reduciendo la exposición humana a sustancias tóxicas. Su aplicación, sin embargo, podría verse limitada por los costos iniciales de implementación.

Complementariamente, se propone incorporar inteligencia artificial mediante algoritmos que faciliten la identificación de componentes y el procesamiento automatizado de residuos, además de optimizar la logística de recolección, mejorando la eficiencia operativa y la toma de decisiones. La principal limitación de esta tecnología radica en el volumen y calidad de los datos requeridos para entrenar los modelos de IA.

Finalmente, la implementación de un sistema basado en tecnología Blockchain, se considera una herramienta confiable y transparente para el seguimiento de los residuos a lo largo de toda la cadena de gestión. Su adopción podría fortalecer la trazabilidad, la confianza y el cumplimiento normativo, fomentando prácticas de reciclaje más responsables. No obstante, enfrenta desafíos relacionados con su complejidad técnica y la aceptación por parte de las industrias tradicionales.

REFERENCIAS

ADRIAN, S. et al. Quantities, flows, and the circular economy potential The Global E-waste Monitor 2020, p. 25-26, 2020. [s.l: s.n.].

OLANO, A. et al. LOGÍSTICA INVERSA Y CADENA DE SUMINISTRO EN UNA CAFETERÍA DE CHICLAYO. HORIZONTE EMPRESARIAL, v. 11, n. 1, p. 83–95, 31 jul. 2024.

FABRA, A.; FABRA M. J. Desarrollo de una metodología para la implementación de la Resolución 851 de 2022 en el marco de la gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) en Colombia, 2024. [s.l: s.n.].

MORALES, A. Estudio comparativo del manejo administrativo y legal de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos – RAEE entre Colombia, Brasil, México, Argentina y Chile, 2022. [s.l: s.n.]. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria. Acceso en: 26 sep. 2025.

OLIVEIRA, C. et al. Resíduos eletroeletrônicos: um problema logístico, ambiental ou educacional?, 2025. [s.l: s.n.].

BALDÉ, A. Global E-waste Monitor 2024 Rights statement, 2024. [s.l: s.n.].

BARTOLO, J.; URBINA, J. ESTADO DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS EN COLOMBIA EN EL MARCO GENERAL INTERNACIONAL Y LA GESTIÓN ESPECIFICA DE PAÍSES DE LA UNIÓN EUROPEA, ASIA Y ÁFRICA, 2015. [s.l: s.n.].

CAJO, E. et al. LOGÍSTICA INVERSA Y MEDIO AMBIENTE EN EMPRESAS DE CHICLAYO. HORIZONTE EMPRESARIAL, v. 11, n. 1, p. 208–217, 31 jul. 2024.

CERDÁ, E.; KHALILOVA, A. ECONOMÍA CIRCULAR, ESTRATEGIA Y COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL ECONOMÍA CIRCULAR, 2016. [s.l: s.n.].

Brazil 2022 E-waste statistics. Disponible en: https://globalewaste.org/statistics/country/brazil/2022/. Acceso en: 10 oct. 2025.

Colombia – 2022 - E-waste statistics. Disponible en: https://globalewaste.org/statistics/country/colombia/2022/. Acceso en: 10 oct. 2025.

SADALLA, B. DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS EM INSTITUIÇÕES DE ENSINO SUPERIOR DO ESTADO DE SÃO PAULO: PRÁTICAS ADOTADAS NA USP, UNICAMP E UFSCAR. [s.l: s.n.]. 2019. Disponible em: http://lattes.cnpq.br/9446918897618790. Acceso en: 16 oct. 2025

Ecolecta – Secretaría Distrital de Ambiente. [s.d]. Disponible en: https://www.ambientebogota.gov.co/ecolecta1. Acceso en: 16 oct. 2025

BARBATO, H. et al. RELATÓRIO ANUAL DE ATIVIDADES GREEN ELETRON 2023, 2023. [s.l: s.n.].

ESPINOSA, H.; RODRIGUEZ L. ANÁLISIS DEL IMPACTO SOCIAL Y AMBIENTAL DE LOS PROGRAMAS POSCONSUMO EN BOGOTÁ, 2024. [s.l: s.n.].

FAMÁ, I. El régimen de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) en Argentina, 2019. [s.l: s.n.].

SALAZAR, A.; RICO, A. Estrategias para la Gestión Sostenible de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), 2024. [s.l: s.n.].

FLEISCHMANN, M. REVERSE LOGISTICS NETWORK STRUCTURES AND DESIGN. Business Perspectives on Closed-Loop Supply Chains, 2001. [s.l]. Disponible en: www.erim.eur.nl. Acceso en: 1 oct. 2025

ROGERS, D.; TIBBEN-LEMBKE, R. Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices, 1998. [s.l: s.n.].

COLOMBIA. Ley 1672 de 2013. p. 1, 2013. [s.n.]. Disponible en: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=53825#:~:text=Se%20proh%C3%ADbe%20la%20disposici%C3%B3n%20de,RAEE%20en%20rellenos%20de%20seguridad, Acceso en: 3 oct. 2025.

COLOMBIA. Ley 99 de 1993, 1993. [s.n.]. Disponible en: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297, Acceso en: 16 oct. 2025

LUNDBERG, B. Global WEEE Management: Behavior and Future Projections. Journal of Scientific Reports, v. 2025, n. 1, p. 17–26, 2025.

CAMACHO, A.; ESCOBAR, D. Metodología para la identificación y clasificación de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Colombia. EL ARRENDAJO ESCARLATA, 2020. [s.l.].

EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Decreto N° 284 del 2018. Disponible en: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=85199, 2018. [s.l: s.n.]. Acceso en: 8 oct. 2025

EL MINISTRO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. RESOLUCIÓN No.0851 DE 2022. Disponible en: https://www.cancilleria.gov.co/sites/default/files/Normograma/docs/resolucion_minambienteds_0851_2022.htm, p. 4, 2022. Acceso en: 26 sep. 2025

MIRANDA, R. et al. ECONOMIA CIRCULAR: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA EMPRESAS BRASILEIRAS. Revista de Geopolítica, v. 16, n. 4, p. e709, 22 set. 2025.

Movimento eletrônico não é lixo. Disponível em: https://greeneletron.org.br/movimento-eletronico-nao-e-lixo/. Acceso en: 16 oct. 2025.

Programas posconsumo de electrodomésticos de línea blanca - Secretaría Distrital de Ambiente. Disponible en: https://www.ambientebogota.gov.co/programas-posconsumo-de-electrodomesticos-de-linea-blanca. Acceso en: 16 oct. 2025.

SOUZA, H.; ANDRIOLA, W.; PONTES, H. POLÍTICAS PÚBLICAS E SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL: POTENCIALIDADES E DESAFIOS À GESTÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS NO BRASIL. Revista Eletrônica Acta Sapientia, 2025. [s.l]. Disponible en: https://orcid.org/0009-0009-4968-905X. Acceso en: 26 sep. 2025.

SALAS-NAVARRO, K. et al. Reverse Logistics and Sustainability: A Bibliometric Analysis. Sustainability, 1 jul. 2024.

Panorama do Censo 2022. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/indicadores.html. Acceso en: 16 oct. 2025

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima - MMA. 2024 Disponível em: https://portaldatransparencia.gov.br/orgaos-superiores/44000?ano=2024. Acceso en: 15 oct. 2025.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. SEGUIMIENTO A POLÍTICAS PÚBLICAS AMBIENTALES, p. 40, 2024. [s.l: s.n.].

SINIR+ | Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos. Disponible en: https://sinir.gov.br/perfis/logistica-reversa/habilitacao/. Acceso en: 10 oct. 2025.

BRASIL. EDUCAMBIENTAL | Sobre os programas, 2025. Disponible en: https://educambiental.mma.gov.br/index.php/saiba-mais/sobre-o-programa. Acceso en: 16 oct. 2025.

CASTILLO, A. SEGUMIENTO Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE GESTIÓN AMBIENTAL DE LA EMPRESA TEJIDOS SINTÉTICOS DE COLOMBIA – TESTICOL S.A. EN EL PERIODO DE MARZO A AGOSTO DE 2019, 2019. [s.l: s.n.].

ROYS, P. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS EN UNIVERSIDADES DE COLOMBIA Y MÉXICO, 2024 [s.l: s.n].

VARGAS, F. Gestión Ambiental del Manejo de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) provenientes de la comercialización en Tiendas por Departamento, 2017 [s.l: s.n.].

VÁZQUEZ, A. Fortalecimiento del marco legislativo, regulatorio y normativo para la gestión integral de los Residuos de Aparatos Eléctricos Electrónicos (RAEE) en México, hacia un modelo de Circularidad, p. 30, 2025. [s.l: s.n.].

Capítulo 8

10.37423/260911353

ANÁLISE DA REDUÇÃO DE ARRASTO EM FÍSTULAS ARTERIOVENOSAS COM APLICAÇÃO DEPOLÍMEROS: EFEITOS DO PEO E DA ALOE VERA

Jonhattan Ferreira Rangel — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte*

Willyam Brito de Almeida Santos — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte*

Angélica Aline Campelo Gomes — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte*

André Menezes de Freitas Vale — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte*

Kleiber Lima de Bessa — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte*

Amanda Melissa Damião Leite Lins — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte*

RESUMO

O uso de polímeros no escoamento de fluidos é uma tecnologia amplamente aplicada para reduzir o consumo de energia e manter a pressão do sistema. Uma aplicação menos explorada e estudada é o uso desses polímeros em sistemas que envolvem fluxo sanguíneo, especialmente em fístulas arteriovenosas (FAV). O presente estudo teve como objetivo analisar a redução do arrasto e os efeitos no escoamento a partir da aplicação de óxido de polietileno (PEO) e extrato de Aloe vera em uma fístula arteriovenosa real, fabricada por impressão 3D. Inicialmente, a FAV foi fabricada e, em uma configuração experimental, as condições de escoamento foram analisadas com a adição de PEO nas concentrações de 50, 30 e 10 ppm e de Aloe vera nas concentrações de 400, 300, 200 e 100 ppm. Os valores de pressão foram analisados em sete pontos da FAV, e observou-se que, com a aplicação de PEO, ocorreram maiores reduções de arrasto (RD) em concentrações mais elevadas, com redução em torno de 44%, e em 10 ppm, a redução de arrasto foi de 11,5%. Com a adição de extrato de Aloe vera, observou-se uma redução máxima de 44,58% na concentração mais alta (400 ppm), caindo para 31,08% nas concentrações de 100 ppm.

PALAVRAS-CHAVE: Redução de arrasto, PEO, Aloe vera, queda de pressão, Fístula arteriovenosa.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o número de pacientes com insuficiência renal crônica tem aumentado consideravelmente. Estima-se que aproximadamente 3% da população mundial seja afetada por essa condição (Saroukhani et al., 2022). No estágio final da doença, o paciente necessita de tratamento dialítico para filtrar o sangue, remover toxinas e o excesso de fluidos. A hemodiálise é um dos tratamentos recomendados, onde o paciente utiliza uma fístula arteriovenosa (FAV) para remover e reinserir o sangue no corpo após o processo de filtragem.

Um dos principais problemas enfrentados pelos pacientes em hemodiálise é a alteração nas condições de fluxo da FAV, associada a pressões oscilantes e fluxo turbulento, que pode resultar em complicações como hiperplasia neointimal, aterosclerose, entre outras.

Uma solução para esse problema (hemólise) é o uso de polímeros redutores de arrasto, que atuam reorganizando o fluxo e reduzindo a perda de energia no sistema, proporcionando um fluxo mais uniforme e reduzindo a quebra prematura das hemácias (Daly et al., 2010).

Polímeros redutores de arrasto são macromoléculas que, quando adicionadas em baixas concentrações a um fluido, têm a capacidade de reduzir a resistência ao fluxo, especialmente em regimes turbulentos. Isso pode levar à redução do gasto energético, à restauração da pressão do fluxo e à reorganização do fluxo (Marchioli e Campolo, 2021; Xi, 2019).

Dentre os polímeros redutores de arrasto, os polímeros naturais desempenham um papel crucial em termos de bioadaptação, disponibilidade e degradação. Alguns tipos de polissacarídeos naturais são consumidos regularmente por humanos sem causar danos ao organismo. Polímeros naturais, como os encontrados na Aloe vera (por exemplo, a acemanna), possuem características físico-químicas e morfológicas que os tornam eficientes na redução do arrasto. Além disso, a Aloe vera pode trazer benefícios para outras áreas dos sistemas biológicos, como a cicatrização de feridas e a regulação intestinal, entre outras.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho, foram realizadas as seguintes etapas: caracterização dos polímeros e identificação de seus grupos funcionais, impressão 3D da FAV em resina e coleta e análise experimental de pressão e fluxo na FAV.

2.1 Seleção e caracterização dos polímeros

Foram utilizados dois polímeros: óxido de polietileno (PEO) e extrato de Aloe vera (Barbadensis miller), obtidos por secagem por atomização. Ambos os polímeros foram adquiridos comercialmente, e a caracterização foi necessária para identificar os componentes presentes em cada um. É importante observar que o extrato de Aloe vera não consiste em um único polímero, mas sim em uma gama de polímeros naturais, principalmente polissacarídeos, encontrados na planta.

O extrato de Aloe vera processado foi caracterizado por FTIR (Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier) para identificar os grupos funcionais e os potenciais componentes do extrato.

2.2 Impressão 3D – fístula arteriovenosa

A fístula arteriovenosa utilizada no procedimento experimental foi modelada por Rangel et al. (2023) utilizando tomografia computadorizada de um paciente com FAV braquiocefálica em membro superior esquerdo. Para o presente estudo, foi realizada uma reimpressão 3D da fístula em resina fotopolimerizável (Impressão 3D por Estereolitografia), aprimorando as características morfológicas da superfície do elemento em estudo, permitindo também uma melhor visualização do fluxo por se tratar de uma resina transparente. A Figura 1 mostra a fístula utilizada após o processo de impressão.

FIGURA 1. Fistula arteriovenosa – impressão 3D

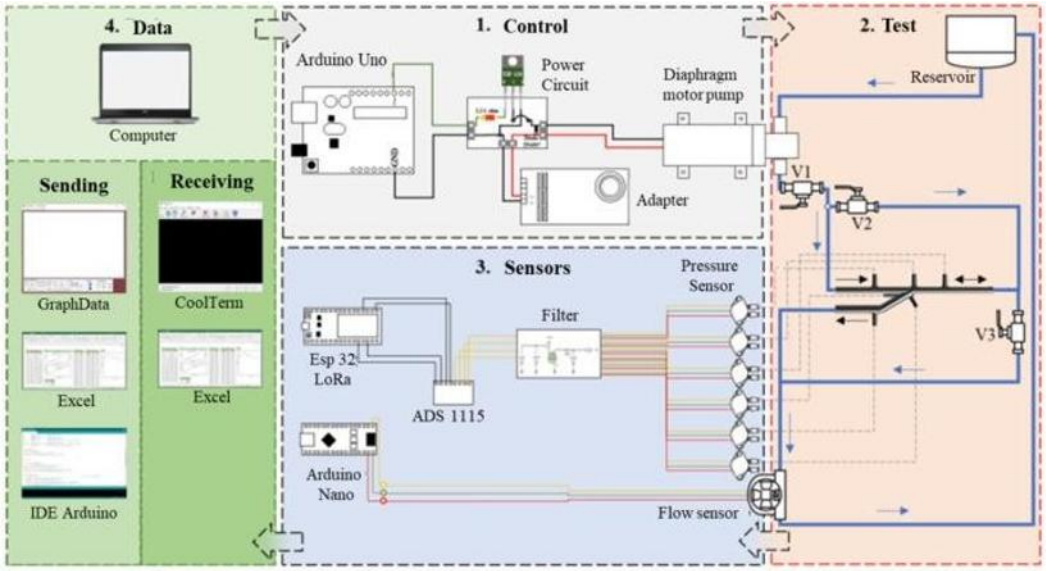


2.3 Análise experimental

A bancada experimental para testes in vitro foi desenvolvida utilizando microcontroladores e sensores de pressão e fluxo para coletar dados experimentais referentes à redução do arrasto com a aplicação de polímeros. Ela é subdividida em seções de reservatório, controle e aquisição de dados. A Figura 2 ilustra a bancada experimental desenvolvida.

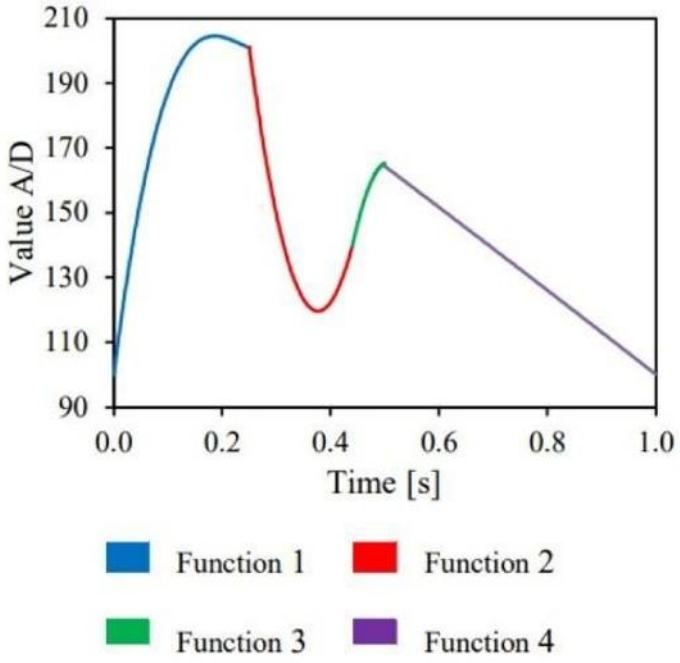
A bancada utilizada para estudos experimentais foi desenvolvida em trabalhos anteriores e redesenhada com melhorias para o estudo atual. No trabalho desenvolvido por Rangel et al. (2023), a bancada experimental não possuía um sistema único para controle dos parâmetros operacionais e coleta de dados, sendo os mesmos processados em diferentes microcontroladores, o que dificultou a coleta de dados em larga escala.

FIGURA 2. Bancada experimental – Esquemático (Rangel et al., 2023)



Os testes experimentais foram desenvolvidos em regimes de fluxo constante e pulsante. Em regimes de fluxo constante, a potência da bomba foi controlada para permanecer em 60% do seu valor total, proporcionando uma vazão média de 1200 ml/min. Para os testes em condições de fluxo pulsante, o sinal PWM (Pulse Width Modulation) da bomba foi controlado com base em uma função da série de Taylor que mimetiza os pulsos sistólico-diastólicos humanos, baseada em 4 funções distintas. A Figura 03 mostra as funções que descrevem o pulso de pressão desenvolvido na bancada experimental.

FIGURA 3. Função – Pulso de pressão



O extrato de Aloe vera e o PEO foram diluídos nas seguintes concentrações: 100, 200 e 300 ppm de Aloe vera e 10, 30 e 50 ppm para PEO. Em todos os testes, utilizou-se 1,5 litro de água tratada (ρ = 997 kg/m³) para diluição. A temperatura do teste foi de 28 °C e o tempo de diluição para cada amostra foi de 8 horas.

A redução do arrasto foi analisada com base na pressão na entrada e na saída da FAV na presença e na ausência de polímeros, de acordo com a Equação 1.

$$DR(\%) = 1 - \frac{\Delta p_p}{\Delta p_{np}} \qquad (1)$$

onde a porcentagem de redução de arrasto é apresentada pela razão entre a variação de pressão na presença do polímero (Δp_p) e a variação sem a presença do polímero (Δp_{np}).

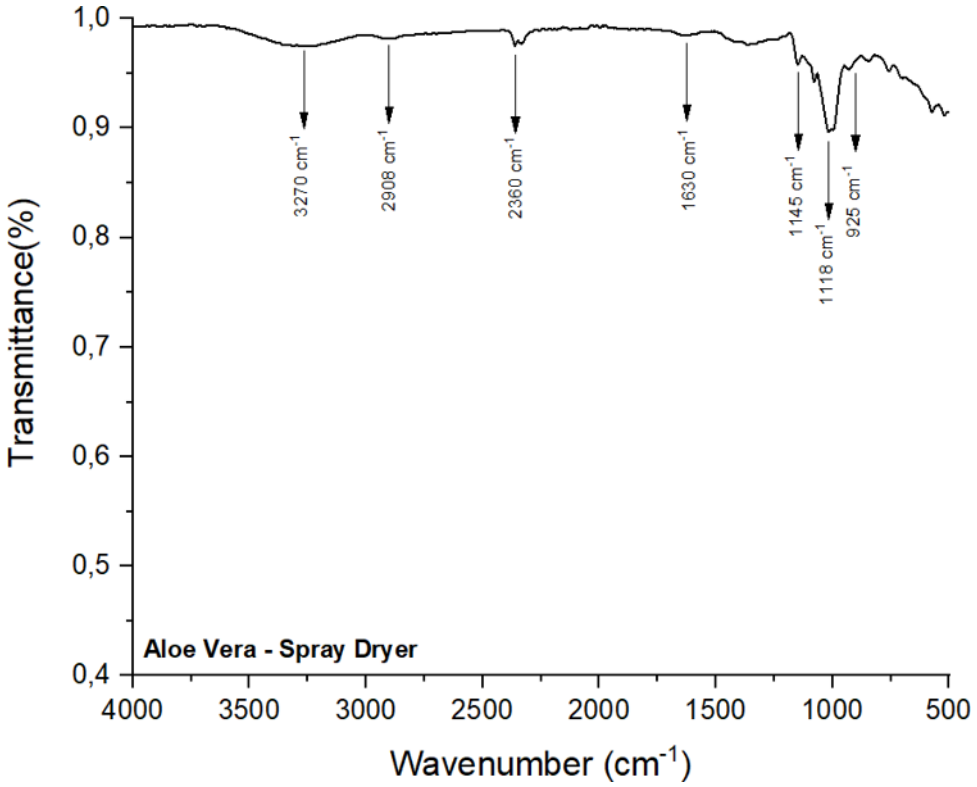
3 RESULTADOS

3.1 Espectrometria por transformada de Fourier

Como a Aloe vera possui diversos polímeros naturais em sua composição, especialmente polissacarídeos como Acemanana e Pectinas (Liu et al., 2019) (Minjares-Fuentes et al., 2018), foi necessário analisar o extrato obtido para identificar os compostos presentes nele.

A Figura 4 mostra o resultado do teste de FTIR da amostra de extrato de Aloe vera obtida por secagem por atomização. A região em torno de 3270 cm-1 refere-se ao estiramento da ligação O-H e representa os grupos hidroxila presentes nas cadeias poliméricas. A presença de cadeias alifáticas é observada através das bandas em torno de 2908 cm-1, enquanto as bandas entre 1200 e 900 cm-1 estão associadas a ligações glicosiladas. A banda proeminente em 925 cm-1 é atribuída às ligações β-glicosídicas presentes em Acemannan (Chelu et al., 2023) (Liu et al., 2019) (Nejatzadeh-Barandozi e Enferadi, 2012).

FIGURA 4. Espectro infravermelho do extrato de Aloe vera – Secado



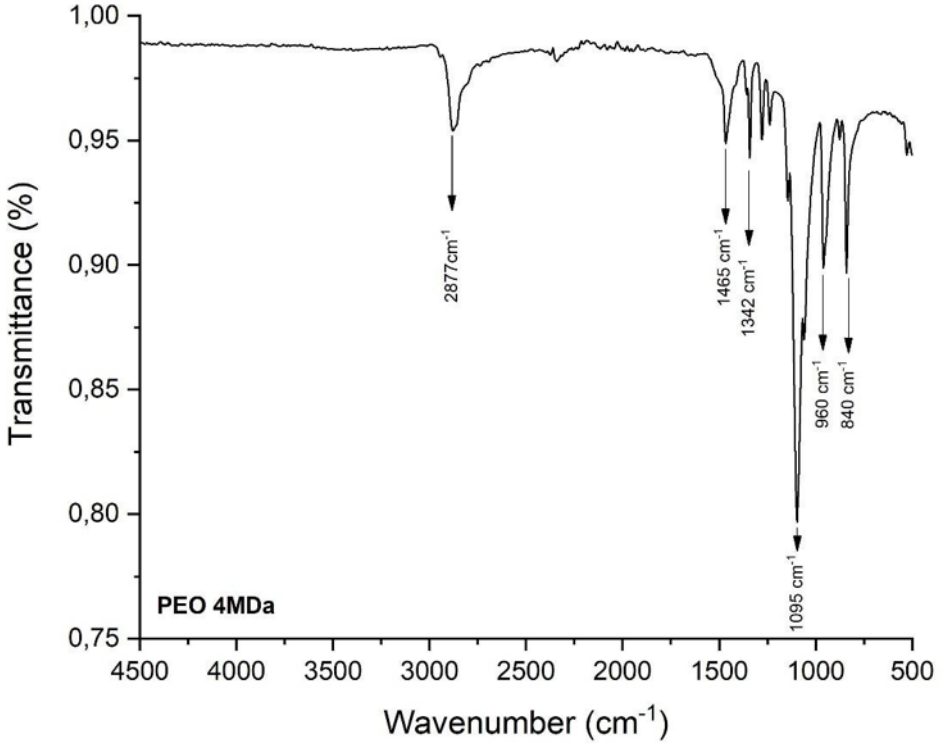
Na amostra submetida a este processo de extração (altas temperaturas no processo de extração), a presença de picos mais suaves e menos bandas indica degradação térmica parcial ou modificação das

estruturas durante o processo de atomização e a alta temperatura. Além disso, é possível observar bandas em torno de 2360 cm-1, o que pode ser atribuído à contaminação atmosférica por CO2.

Em geral, polímeros redutores de arrasto apresentam duas características principais: devem ser flexíveis e ter peso molecular acima de 1 MDa (Chen et al., 2025) (Virk, 1975). O acemanano é um dos polímeros presentes na Aloe vera que atende a esses pré-requisitos.

O óxido de polietileno (PEO) também foi analisado e apresentou seus picos característicos na faixa de 1100 a 1400 cm-1, evidenciando o estiramento assimétrico do grupo éter (C – O – C). A Figura 5 mostra o FTIR do PEO e seus picos de transmitância.

FIGURA 5. Espectro infravermelho do PEO



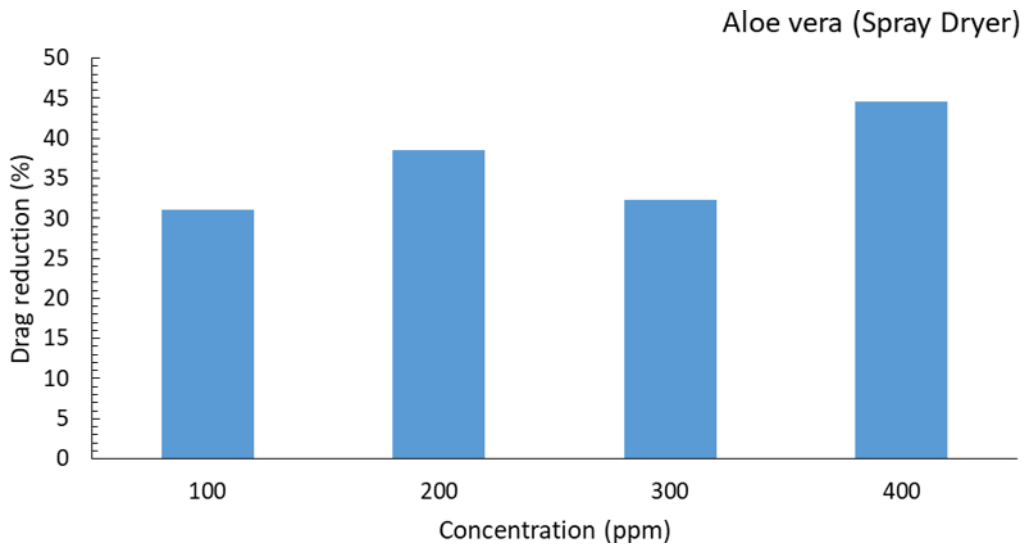
3.2 Redução de Arrasto

Conforme mencionado anteriormente, este estudo tem como objetivo analisar a influência da aplicação do extrato de Aloe vera, obtido por secagem por atomização e contendo seus polímeros naturais, no comportamento do escoamento, avaliando seu desempenho como redutor de arrasto. Além disso, busca comparar seus efeitos com os do óxido de polietileno (PEO), um polímero sintético

amplamente estudado e reconhecido por sua eficiência na redução de arrasto em escoamentos líquidos.

A Figura 6 mostra os valores de redução de arrasto com o uso do secador de aloe vera. Os testes foram conduzidos em regime permanente, com potência da bomba a 60% do valor total e vazão média de 1200 ml/min (± 56). Os pontos analisados foram a entrada e a saída da fístula para verificar o comportamento da pressão com a adição dos polímeros.

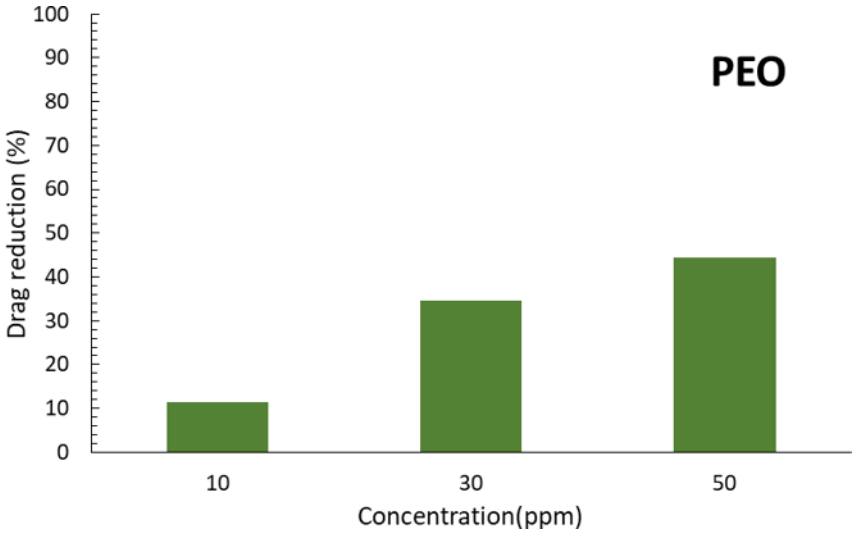
FIGURA 6. Análise da redução do arrasto pela adição de polímeros (Aloe vera – Spray Dryer)



Os valores de redução de arrasto para as concentrações de 100, 200, 300 e 400 ppm foram, respectivamente, 31,08, 38,55, 32,37 e 44,58%. Esses resultados demonstram que a adição desse tipo de extrato é eficiente na redução do arrasto do sistema, garantindo uma redução na perda de energia ao longo do escoamento.

Observou-se também que os valores de pressão observados na entrada da FAV diminuíram com a adição de Aloe vera, o que indica que a presença do polímero também atua na reorganização do escoamento, amortecendo os altos valores de pressão em determinados pontos do sistema. Como resultado, observou-se que a adição de 400 ppm de extrato causou uma diminuição na pressão de entrada de aproximadamente 20% do total, quando comparada ao valor do escoamento somente de água.

FIGURA 7. Análise da redução do arrasto pela adição de polímeros (PEO)



A Figura 7 apresenta os valores de redução de arrasto com o uso de PEO nas concentrações de 10, 30 e 50 ppm. Pode-se observar que a adição deste polímero causou uma redução no arrasto do FAV de 11,47, 34,54 e 44,41%, respectivamente, com o aumento da concentração. Com o uso de PEO, valores de redução dessa ordem eram esperados, uma vez que.

4 CONCLUSÕES

A pesquisa confirmou a eficácia de polímeros redutores de arrasto, como o PEO, já estudado, e o extrato de Aloe vera, na melhoria do comportamento do fluxo em fístulas. O extrato de Aloe vera, em particular, demonstrou desempenho comparável ao PEO em diversas concentrações, com benefícios adicionais relacionados à sua origem natural e propriedades biológicas.

A redução do arrasto nas condições experimentais analisadas não apenas otimiza o processo de hemodiálise, como também ajuda a minimizar as complicações associadas ao tratamento. O estudo abre novas possibilidades para o uso de polímeros naturais no tratamento de doenças crônicas e sistemas biológicos, contribuindo, em última análise, para a melhoria do bem-estar do paciente.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

CHELU, M.; POPA, M.; OZON, E. A.; PANDELE CUSU, J.; ANASTASESCU, M.; SURDU, V. A.;

CALDERON MORENO, J., MUSUC; A. M. High-content aloe vera based hydrogels: Physicochemical and pharmaceutical properties. Polymers, v. 15, n. 5, p. 1312, 2023.

CHEN, Y.; LIN, X.; HE, M.; YANG, P.; LI, C.; NECHVAL, A. M.; VALEEV, A. R. An experimental investigation on the turbulent drag reduction effect of polyacrylamide solution in the loop pipe. Journal of Pipeline Science and Engineering, v. 10, p. 100-264, 2025.

LIU, C.; CUI, Y.; PI, F.; CHENG, Y.; GUO, Y.; QIAN, H. Extraction, purification, structural characteristics, biological activities and pharmacological applications of acemannan, a polysaccharide from aloe vera: A review. MoleculesMDPI AG, v. 24, n. 8, p. 1554, 2019.

MARCHIOLI, C; CAMPOLO, M. Drag reduction in turbulent flows by polymer and fiber additives. Kona Powder and Particle Journal, v. 38, p. 64–81, 2021.

MINJARES-FUENTES, R.; FEMENIA, A.; COMAS-SERRA, F.; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, V. M. Compositional and structural features of the main bioactive polysaccharides present in the aloe vera plant. Journal of AOAC International, v. 101, n. 6, pp. 1711–1719, 2018.

NEJATZADEH-BARANDOZI, F.; ENFERADI, S. FT-IR study of the polysaccharides isolated from the skin juice, gel juice, and flower of Aloe vera tissues affected by fertilizer treatment. Organic and Medicinal Chemistry Letters, v. 2, n. 1, p. 33, 2012.

RANGEL, J. F.; DE ALMEIDA SANTOS, W. B.; DE CARVALHO COSTA, T. H.; DE BESSA, K. L.; MELO, J. D. D. Pressure analysis in rigid and flexible real arteriovenous fistula with thickness variation in vitro. Journal of Functional Biomaterials, v. 14, n. 6, p. 310, 2023.

SAROUKHANI, A.; ZADEH, A. R.; AHMADI, S. M. Incidence of steal syndrome following arteriovenous fistula and arteriovenous graft. International Journal of Burns and Trauma, v. 10, n. 3, p. 121-122, 2022.

VIRK, P. S. Drag reduction fundamentals. AIChE Journal, v. 21, n. 4, p. 625–656, 1975.

XI, L. Turbulent drag reduction by polymer additives: Fundamentals and recent advances. Physics of Fluids, v. 31, n. 6, p. 302, 2019.

Capítulo 9

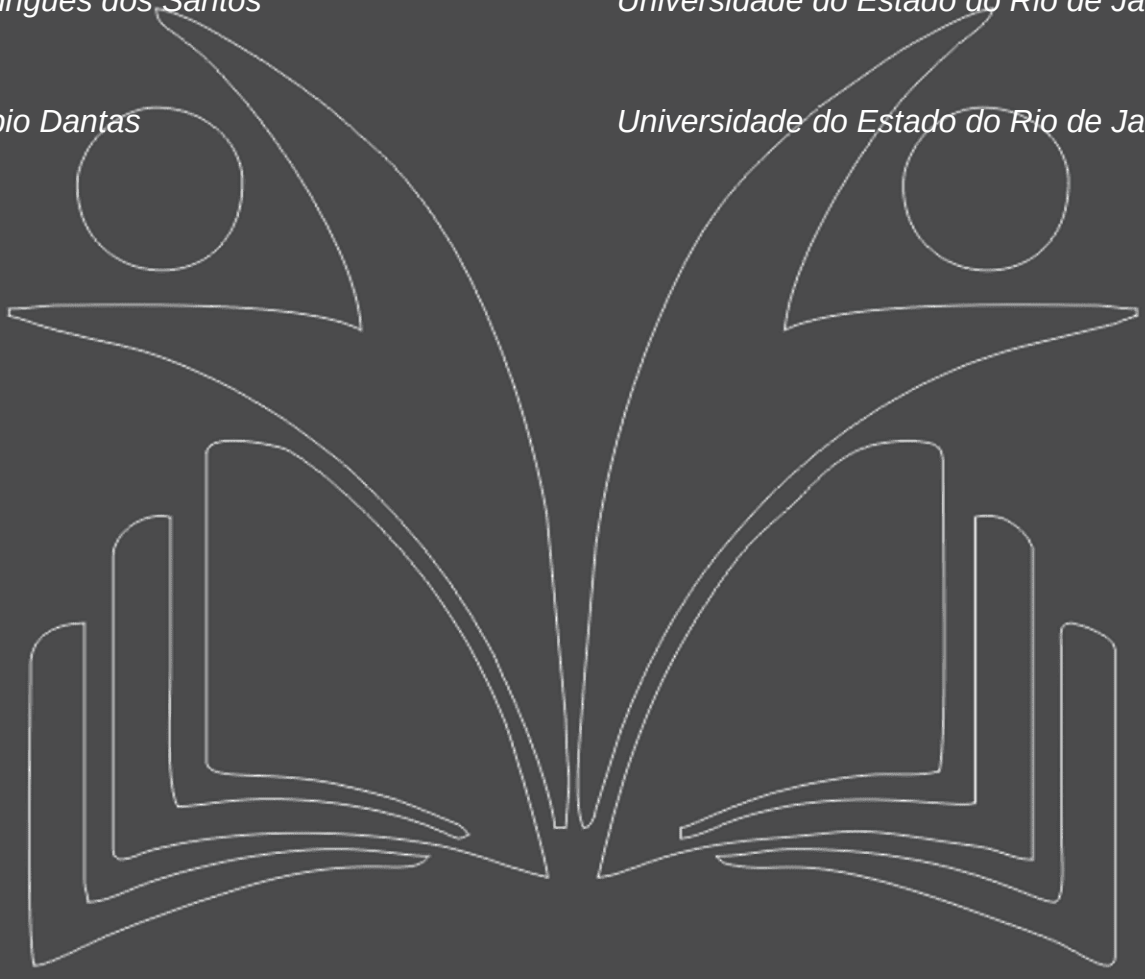
10.37423/260911358

SUSTENTABILIDADE E DESENVOLVIMENTO NO BRICS: O EQUILÍBRIO ENTRE OS PILARES ECONÔMICO, SOCIAL E AMBIENTAL

Lívia Adriana Costa Estevam da Silva — *Universidade do Estado do Rio de Janeiro*

Daiane Rodrigues dos Santos — *Universidade do Estado do Rio de Janeiro*

Alexis Toríbio Dantas — *Universidade do Estado do Rio de Janeiro*



RESUMO

A ampliação da participação dos países do BRICS na economia internacional ao longo da última década intensificou o interesse em compreender como essas economias têm conciliado o crescimento econômico com objetivos sociais e ambientais. Apesar das diferenças quanto ao nível de desenvolvimento, à estrutura produtiva e às prioridades de políticas públicas, os países do bloco compartilham desafios relacionados à promoção do desenvolvimento, à preservação ambiental e à formulação de estratégias voltadas para uma trajetória de crescimento compatível com critérios econômicos, sociais e ambientais. O presente estudo analisou o desenvolvimento dos países fundadores do BRICS sob a ótica do Triple Bottom Line (TBL), com uma metodologia mista com revisão bibliográfica, estatística descritiva e normalização dos dados (Min-Max). Os resultados destacam assimetrias em todos os pilares, a China consolida sua hegemonia econômica e, apesar do avanço no cenário global, não é o país mais equilibrado do bloco. A Rússia desbanca a China como o país mais equilibrado entre os três eixos do grupo. O Brasil apesar de suas vulnerabilidades socioeconômicas, é um grande líder na preservação ambiental e matriz energética. A Índia ainda que tenha uma economia em expansão e bom desempenho ambiental, é penalizada pelo pilar social devastador. Em contraste, a África do Sul exibiu o pior desempenho do bloco, isso porque há inúmeras fragilidades em seu sistema para retomar um projeto de desenvolvimento econômico e social. Conclui-se que a cooperação entre as economias dos BRICS é importante para o fortalecimento do bloco e para a consolidação de sua agenda de cooperação Sul-Sul e a atuação do Novo Banco de Desenvolvimento pode fomentar projetos de equidade social e inovação verde.

Palavras-Chaves: BRICS; Triple Bottom Line (TBL); Sustentabilidade; Desenvolvimento.

1 INTRODUÇÃO

O conceito original de BRIC, um acrônimo para Brasil, Rússia, Índia e China, foi idealizado em 2001 por um banco de investimentos para designar economias emergentes com alto potencial de crescimento. Naquela época, a projeção de O'Neill (2001) era de que o bloco poderia, eventualmente, superar a economia da União Europeia (UE) em tamanho de comércio. A cooperação entre esses países começou a se formalizar em 2008, durante a crise do Subprime, tendo como objetivo aquecer o mercado financeiro a partir de interesses políticos e econômicos comuns (Sampaio; Oliveira, 2024) e (Salache, et al. 2026).

O movimento supracitado ganhou força no contexto da crise econômica global de 2008, que despertou a percepção de que os países centrais estariam perdendo poder na ordem mundial. Nesse cenário, a China, juntamente com outras nações emergentes, passou a ser vista como um contrapeso à posição dominante dos EUA e da Europa, indicando a formação de um novo polo de poder. A crise consolidou o papel do G20, e a formação do bloco tornou-se crucial para que chefes de Estado do BRIC pudessem negociar saídas conjuntas (Brasil, 2025).

A primeira cúpula oficial do bloco aconteceu em 2009, e em 2011, com a integração da África do Sul, o grupo ganhou corpo como BRICS. Uma expansão ainda mais significativa, e recente, ocorreu em 2024, quando Egito, Etiópia, Irã, Emirados Árabes Unidos e Arábia Saudita se uniram ao bloco, dando início ao BRICS+. Essa nova configuração representa a ampliação da aliança com quase metade da população mundial e um enorme peso econômico e geopolítico (Canuto, et al., 2025; Sampaio, et al., 2024).

O BRICS é caracterizado como uma coalizão político-diplomática, não se enquadrando nas teorias convencionais de integração regional, pois não é um bloco econômico em sentido estrito e não possui um único documento constitutivo. No entanto, mecanismos definidos na VI Cúpula do BRICS, em 2014, e formalizado na “Declaração de Fortaleza” permitem que seus membros trabalhem de forma mais permanente, principalmente com a criação do NBD e ACR, ampliando a relação intra-BRICS e, também, com o “Plano de Ação” em que institucionaliza uma agenda de reuniões regulares, grupos de trabalho em diversas áreas, como finanças, comércio, agricultura, saúde, segurança e ciência e tecnologia. Assim, arquitetando uma estrutura permanente para o trabalho contínuo do bloco (Brasil, 2014). Atualmente, o conceito tornou-se um importante objeto de estudo para compreender as tendências do cenário internacional. Sua influência é notável no G20, o mais importante fórum de governança

global, onde os acordos prévios entre os países do BRICS costumam ser mais significativos do que entre nações de uma mesma região.

Desde a primeira Cúpula, em 2009, o BRICS tem ampliado suas atividades em múltiplos setores. No setor financeiro, os países membros passaram a atuar de forma concertada, a partir da crise de 2008, no âmbito do G20, do Fundo Monetário Internacional (FMI) e do Banco Mundial, com o objetivo de reformas concretas das estruturas da governança financeira global, em linha com o aumento do peso relativo dos países emergentes na economia global. Em julho de 2014, na Cúpula de Fortaleza, houve um acordo para a criação do Novo Banco de Desenvolvimento do BRICS (NBD) (Terra et al., 2018). Assinado em 2015, a cidade de Xangai, na China, recebeu a primeira sede do novo banco. O objetivo de fundar o Novo Banco de Desenvolvimento (NBD) é para viabilizar, principalmente, os investimentos em infraestrutura e desenvolvimento sustentável dos países do BRICS e Sul Global (Batista Jr, 2016).

Diante do contexto exposto, este artigo tem como objetivo analisar o desempenho dos países fundadores do BRICS sob a perspectiva da sustentabilidade, utilizando o arcabouço conceitual do Triple Bottom Line (TBL). Para isso, são examinados indicadores econômicos, sociais e ambientais, articulando técnicas quantitativas e qualitativas, a fim de avaliar o grau de equilíbrio entre os três pilares e identificar assimetrias estruturais no desenvolvimento nacional de Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O conceito de Triple Bottom Line (TBL) proposto por John Elkington redefine o modo como empresas avaliam seu desempenho ao incorporar, além do resultado financeiro tradicional, dimensões ambientais e sociais. A partir da constatação de que a sustentabilidade corporativa não pode ser reduzida a iniciativas de “greening” ou simples eficiência operacional, o TBL pode ser visto como uma forma de harmonizar o bottom line econômico com as emergentes preocupações ambientais e de justiça social. Nesse modelo, o desempenho empresarial passa a ser analisado em três eixos interdependentes, econômico, ambiental e social, que operam como “placas tectônicas”, movendo-se de forma não linear e por vezes conflituosas. De acordo com Elkington, (1997), a sustentabilidade requer novas métricas, auditorias e modelos de accountability capazes de captar o valor do capital natural, social e humano, além do capital financeiro, e que essa transição representa um desafio tanto para a governança corporativa quanto para os mercados.

Rogers e Hudson (2011) ressaltam que o Triple Bottom Line constitui um arcabouço prático para operacionalizar a sustentabilidade ao articular, de forma integrada, objetivos econômicos, ambientais e sociais (people, planet, profit). Mais do que um slogan, o TBL cumpre duas funções centrais: (i) introduz critérios e indicadores específicos para cada uma das três dimensões, trazendo-as para o campo da contabilidade gerencial e da "business-ledger accountability", sob a lógica de que "o que é medido é feito"; e (ii) evidencia as sinergias e tensões entre esses domínios por meio de uma perspectiva sistêmica, na qual o ideal é atuar na interseção dos três círculos do diagrama de Venn, mas reconhecendo que, em muitos casos, trade-offs exigem decisões em um patamar mais elevado de reflexão estratégica (Rogers e Hudson, 2011). Nesse sentido, os autores argumentam que o TBL demanda uma forma distinta de liderança, distribuída, baseada em "inteligência disseminada" e em mudanças de percepção e prática em todos os níveis da organização, na qual gestores e praticantes incorporam, simultaneamente, racionalidades econômica, socioambiental e regulatória no desenho de processos, produtos e modelos de negócios.

A ideia de Triple Bottom Line (TBL), propõe que o sucesso de um país, uma organização deve ser estimada a partir de três pilares: prosperidade econômica (Profit), equidade social (People) e qualidade ambiental (Planet). No cenário dos países do BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul), a aplicação dessa estrutura enfrenta desafios particulares. Ao contrário dos mercados desenvolvidos, em que o TBL é frequentemente impulsionado por pressões institucionais maduras, nos mercados emergentes observa-se uma tensão constante entre a necessidade de crescimento econômico acelerado e a mitigação de passivos socioambientais (Urban e Hwindingwi, 2016; Wise, 2020). A literatura recente sugere que o comportamento das empresas e Estados nesses territórios não são homogêneos, variando conforme a cultura local, a potência das instituições e as imposições da globalização (Ralston et al., 2014) (Qi; Yang, 2023).

O pilar econômico nos BRICS é frequentemente priorizado como um mecanismo de legitimação global e sobrevivência local. Em mercados emergentes africanos (incluindo a África do Sul), o desempenho financeiro das Multinacionais é diretamente dependente de fatores institucionais básicos, especialmente um sistema judiciário independente e segurança nacional (Urban; Hwindingwi, 2016). Sem "lei e ordem", os custos de transação inviabilizam o lucro (bottom line econômico).

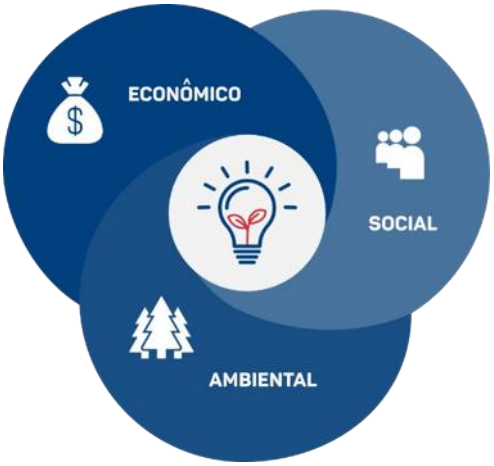
Ademais, estudos apontam que a futura geração de líderes de negócios nos BRICS (os atuais estudantes) tende a valorizar mais a responsabilidade econômica do que a geração atual de gestores.

Esse foco instrumental sugere que o crescimento financeiro continua sendo a ideologia dominante para quem cresce em economias em transição (Ralston et al., 2014).

Wise (2020) argumenta que a dimensão econômica também é impulsionada, ao que ele chama, pela "regeneração de imagem". Isso porque os países do BRICS aproveitam megaeventos para atrair investimento estrangeiro, embora essa estratégia frequentemente resulte em "elefantes brancos" e questione a viabilidade econômica a longo prazo do uso de fundos públicos. O pilar ambiental no BRICS apresenta um panorama multifacetado, onde a degradação histórica coexiste com as novas iniciativas de inovação verde. Por isso, para os países do BRICS, a regulação do governo rígida é o motor que impulsiona rumo à Inovação Verde (Green Innovation). O eixo ambiental exige intervenção estatal (impostos, leis) para florescer no longo prazo. Desse modo, a abertura global não se estende apenas ao comércio, ela viabiliza o compartilhamento de tecnologias limpas necessárias para mitigar os danos do crescimento industrial rápido (Qi; Yang, 2023).

Vale destacar que a urgência ambiental dentro do bloco não é homogênea. Na China, por exemplo, a nova geração futura está mais preocupada com o meio ambiente do que a geração atual, uma resposta direta à poluição visível (Ralston et al., 2014). Entretanto, na Rússia, o eixo ambiental é a menos examinado, tanto por gestores atuais quanto futuros. A literatura analisada aponta a dimensão social como a mais complexa e, muitas vezes, a mais negligenciada na prática estratégica dentro do bloco. Isso porque embora as instituições locais nos países emergentes impactem no lucro, elas não exercem pressão de maneira significativa sobre os relatórios sociais das empresas (Urban; Hwindingwi, 2016).

Figura 1 – Ilustração Triple Bottom Line



Fonte: RBEnergia. 19 Ago. 2024. Disponível em: https://www.rbenergia.com.br/blog/tripe-da-sustentabilidade-e-o-mercado-livre-de-energia/. Acesso em: 04 Dez. 2025

3 METODOLOGIA

A base metodológica desse estudo fundamenta-se em uma abordagem múltipla, combinando técnicas quantitativas e qualitativas para proporcionar uma análise completa do tema. O eixo quantitativo da pesquisa adota a Estatística Descritiva como principal ferramenta, permitindo a síntese e a organização dos dados coletados. Por definição, a estatística descritiva agrupa um conjunto de técnicas que visam sumarizar os dados de uma pesquisa por meio de tabelas, gráficos e medidas-resumo, como valor mínimo, máximo, média, moda, mediana, variância e desvio padrão (Morais, 2005). Aplicando essa metodologia, o estudo se concentrou na análise das principais características econômicas dos países fundadores que compõem o BRICS+. Foram utilizadas medidas-resumo como média, valor máximo, valor mínimo e variância para examinar as similaridades e as diferenças entre os membros do bloco. As variáveis analisadas incluíram o Produto Interno Bruto (PIB), PIB per capita, taxas de inflação e desemprego, Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), índice de Gini, emissões de gás carbônico, exploração madeireira, floresta estável e consumo em energia renovável. Para isso, os dados foram levantados a partir de fontes de alta credibilidade, como as plataformas “The World Bank”, “PNUD”, “Plataforma sobre Pobreza e Desigualdade do Banco Mundial”, “Carbon Global Atlas” e “Global Forest Watch”, que foram indispensáveis para a construção de um panorama econômico, social e ambiental conciso.

Destaca-se que, paralelamente, a pesquisa desenvolveu, também, uma vertente de natureza qualitativa, com abordagem exploratória. Esse eixo metodológico é dedicado à análise de documentos primários e secundários. Este processo envolveu o exame de declarações oficiais emitidas nas Cúpulas do BRICS, bem como publicações e relatórios de instituições financeiras e de desenvolvimento relevantes, como o Novo Banco de Desenvolvimento (NBD). A investigação desse material foi conduzida por meio da técnica de análise bibliográfica, com o objetivo de identificar as principais narrativas e a formação de um importante bloco, que o Brasil está inserido, e que pode ser fundamental para o desenvolvimento econômico sustentável do país.

Com o objetivo de favorecer a comparabilidade entre variáveis com unidades e escalas diferentes, aplicou-se a metodologia de normalização Min–Max, que transforma os valores originais em uma escala padronizada entre 0 e 1. Nesse processo, indicadores classificados como “positivos” (em que valores maiores representam melhor desempenho), como PIB, IDH, floresta estável e consumo de energia renovável, foram tratados por meio da fórmula padrão Min–Max. Para indicadores “negativos” (em que valores maiores representam pior desempenho), como inflação, desemprego,

Gini, emissões de CO_2 e exploração madeireira, aplicou-se uma transformação inversa. Após a normalização, os indicadores foram agregados aos pilares econômico, social e ambiental por média simples, sem aplicação de pesos, dada a natureza exploratória do estudo e em conformidade com a literatura que utiliza TBL em contextos comparativos preliminares, (Malefaki et al., 2025) e (Gupta et al., 2025).

No presente artigo a normalização foi realizada por meio da Equação (1):

$$I^*_{ui} = \frac{I_{iii} - \min(I_{ii})}{\max(I_u) - \min(I_u)} \quad (1)$$

Em que $Iiii$ representa o valor original do indicador (jj) para o país (i), enquanto min(Iii) e max(Iii)correspondem, respectivamente, aos menores e maiores valores observados desse indicador na amostra.

Para indicadores em que valores mais elevados representam condição menos favorável (indicadores de custo), utilizou-se a transformação inversa apresentada na Equação (2):

$$I^*_{ui} = \frac{\max(I_{ii}) - I_{ii\ i}}{\max(I_u) - \min(I_u)} \quad (2)$$

Após a normalização, os indicadores foram agregados segundo a estrutura do Triple Bottom Line (TBL), organizando-se nos pilares econômico, social e ambiental. O índice de cada dimensão foi obtido pela média aritmética simples dos indicadores pertencentes ao respectivo pilar, conforme a Equação (3):

$$TBLki = \frac{1}{n_k} \sum_{ii=1}^{n_k} I^*_{ui} \quad (3)$$

em que $TBLki$representa o índice do pilar (k) (econômico, social ou ambiental) para o país (i), nkcorresponde ao número de indicadores pertencentes ao pilar (k) e $I*$ representa o valor normalizado do indicador (j).

Por fim, o índice agregado de desenvolvimento sustentável foi calculado pela média aritmética dos três pilares, atribuindo pesos iguais às dimensões econômica, social e ambiental, conforme a Equação (4):

$$TBL_i = \frac{TBL_{Econ,i} + TBL_{Soc,i} + TBL_{Amb,i}}{3} \quad (4)$$

em que $TBLi$representa o índice sintético de desenvolvimento sustentável do país (i), enquanto $TBLEcon,i$, $TBLSoc,i$e $TBLAmb,i$ correspondem, respectivamente, aos índices econômico, social e ambiental.

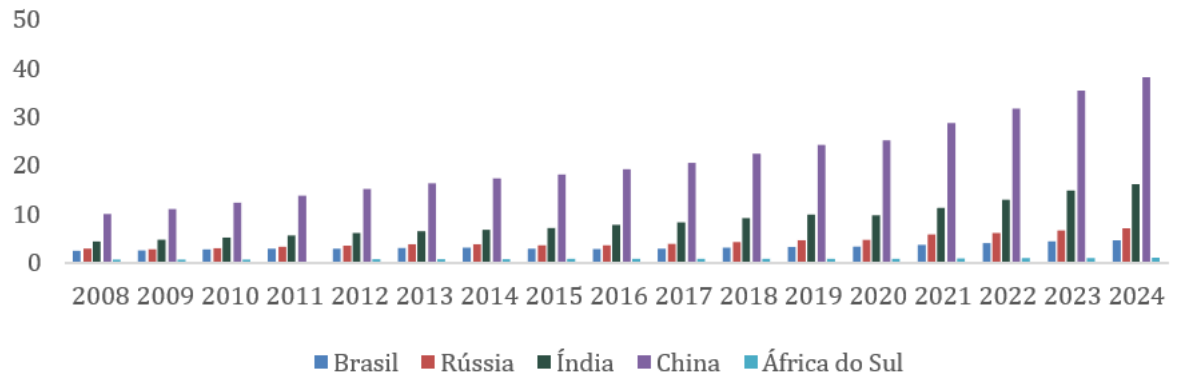
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Pilar econômico

Para melhor compreender o papel do BRICS na economia mundial e na geopolítica contemporânea, é importante conhecer as características dos países que integram esse bloco. Nesta seção, serão apresentados os principais dados do Pilar Econômico, sendo eles o Produto Interno Bruto (PIB), a renda per capita, a inflação e o desemprego. Esses aspectos são relevantes para entender as potencialidades e as limitações que cada país possui, assim como as semelhanças e as diferenças que existem entre eles. Além disso, essas características também influenciam nas relações econômicas e comerciais que os países do BRICS mantêm entre si e com o restante do mundo.

O Produto Interno Bruto (PIB) é um importante indicativo econômico e, é notável que o PIB chinês é o maior da cooperação BRICS, tendo aproximadamente dezoito trilhões de dólares como PIB de valor máximo e, no mundo é menor, apenas, que o PIB estadunidense. A África do Sul é a nação que possui menos oscilações neste indicativo, entretanto, durante todos os anos analisados é o que possui menor crescimento no Produto Interno Bruto. No Gráfico 3 apresenta o desempenho econômico de cada um dos cinco países.

Gráfico 1 – PIB nominal dos países pertencentes aos BRICS de 2008 a 2024 (em trilhões US$)

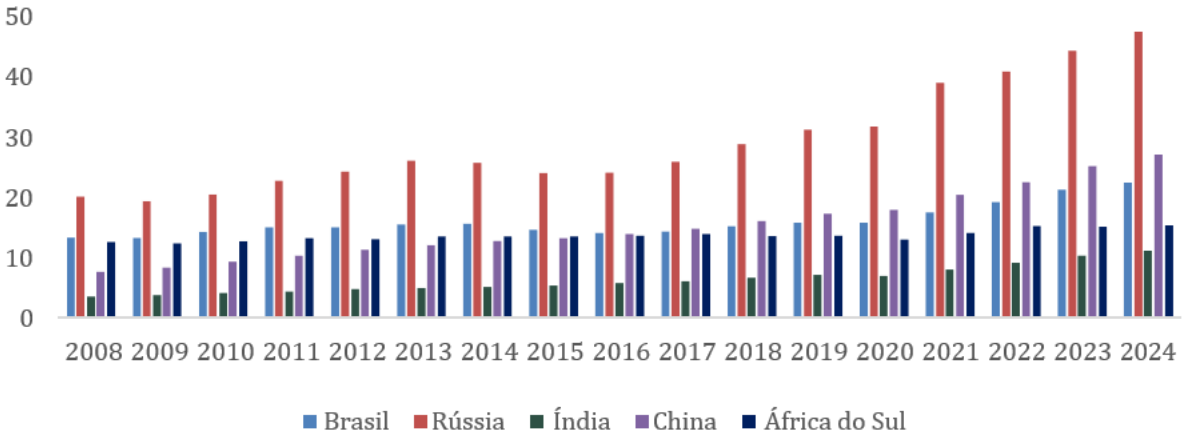


Fonte: Adaptado de The World Bank (2025)

Durante a maior parte das últimas duas décadas, a China destacou-se como a economia de maior crescimento entre os países do BRICS. Esse crescimento robusto foi impulsionado por uma série de reformas econômicas, investimentos maciços em infraestrutura e uma política agressiva de exportações. No entanto, a partir de meados da década de 2010, a Índia começou a emergir como a economia de crescimento mais rápido do grupo, beneficiando-se de uma população jovem, um mercado interno em expansão e reformas econômicas significativas. Projeções indicam que a Índia deve manter essa posição de liderança em termos de crescimento do PIB na década de 2020, impulsionada por setores como tecnologia da informação, manufatura e serviços.

No gráfico 2 é explorado os comportamentos econômicos em diferentes contextos históricos. No ano de 2009, por exemplo, o Brasil e a Rússia reduziram o PIB per capita após a crise do Subprime se transparecer em 2008, ao passo que a Índia, China e África do Sul retomaram o aquecimento de suas economias. Em 2020, ano marcado pelo período pandêmico da COVID-19, todos os países revelam na amostragem uma queda na economia de seus países, entretanto, apenas a China expressou um crescimento sutil na renda per capita.

Gráfico 2 – PIB per capita nominal dos países pertencentes aos BRICS de 2008 a 2024 (em US$)

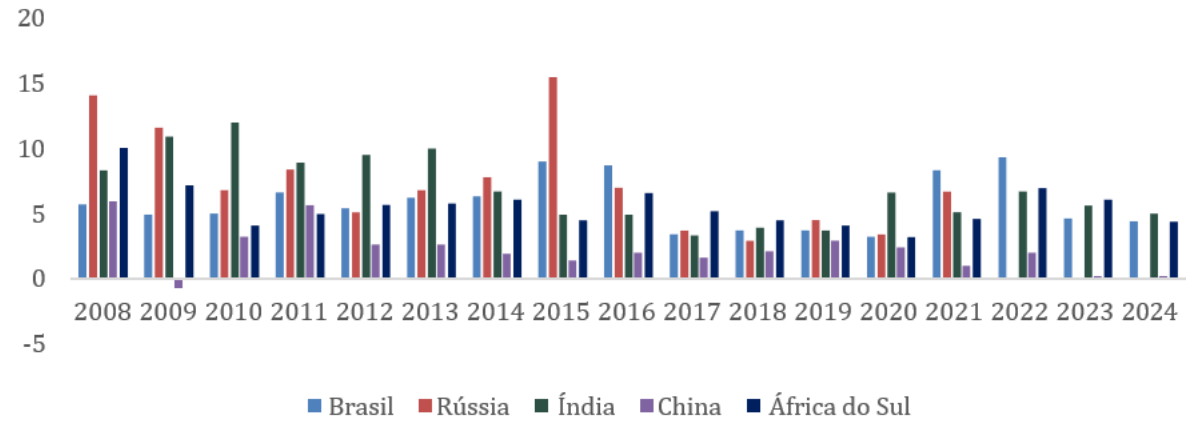


Fonte: Adaptado de The World Bank (2025)

Os cinco países do BRICS enfrentaram desafios relevantes na crise de 2008 e na pandemia de 2020. A China foi a única a manter crescimento positivo em ambos os episódios, impulsionada por forte demanda interna e resposta estatal rápida. A Índia preservou crescimento na Grande Recessão, mas sofreu forte impacto em 2020. Já o Brasil entrou em recessão profunda em 2014, em meio a instabilidade econômica e política e queda das commodities. A Rússia também enfrentou recessão nesse período, afetada pela queda do preço do petróleo e pelas sanções após a anexação da Crimeia.

No campo inflacionário, todos os países apresentaram oscilações entre 2008 e 2024. Observou-se hiperinflação na Rússia, enquanto a China registrou deflação em 2009, evidenciando dinâmicas macroeconômicas distintas dentro do bloco.

Gráfico 3 – Inflação dos países pertencentes aos BRICS de 2008 a 2024 (em %)

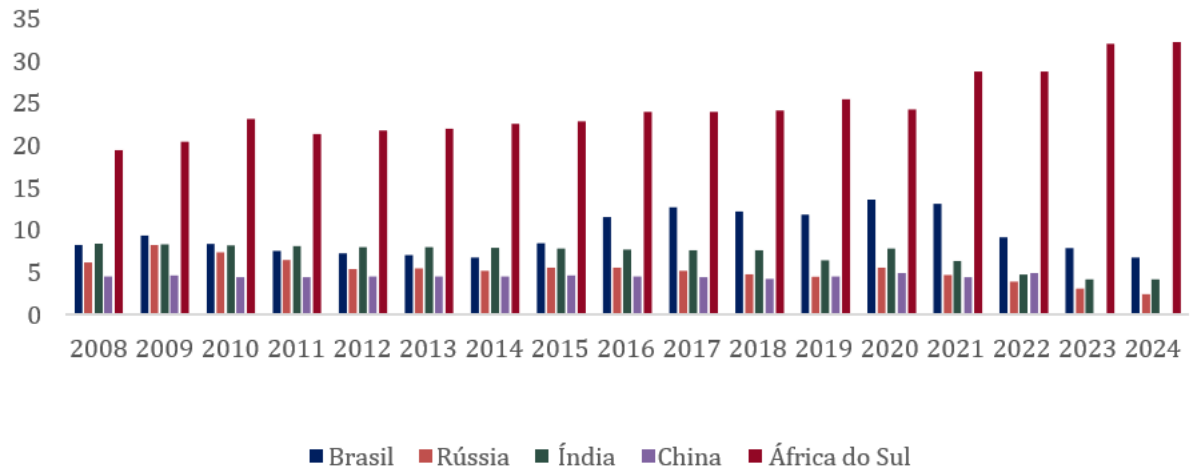


Fonte: Adaptado de The World Bank (2025)

É interessante destacar que no período da pandemia do coronavírus o Brasil teve a inflação alta, porém o consumo – poder de compra - não foi reduzido. Isso se deve à política de assistência financeira implementada, a fim de reduzir os impactos da crise econômica que afetou, principalmente, os brasileiros prejudicados pelo isolamento social.

O desemprego é outro indicativo necessário, pois é capaz de avaliar o desempenho econômico e, além disso, tem como contraste um consumo baixo quando se choca com a recessão econômica e redução do bem-estar social.

Gráfico 4 – Desemprego dos países pertencentes aos BRICS de 2008 a 2024 (em %)



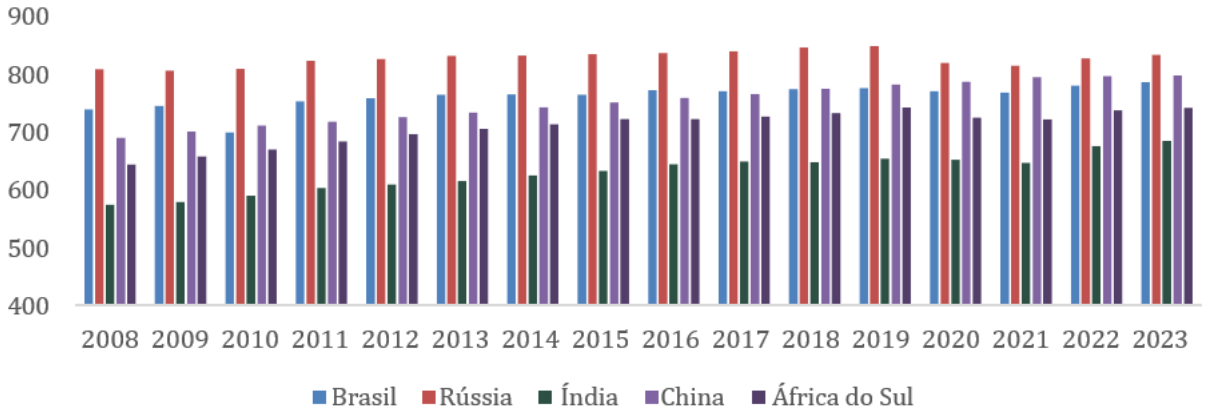
Fonte: Adaptado de The World Bank (2025)

4.2 Pilar social

Nesta seção, serão apresentados os principais dados do Pilar Social, sendo o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e índice de Gini. A seleção desses indicativos é crucial para compreender como o capital acumulado pelos países do BRICS se converte em políticas que assegurem a qualidade de vida entre toda a população de suas respectivas nações para o desenvolvimento nacional.

O índice de desenvolvimento humano se estende da métrica exclusivamente econômica, como o PIB. Ele representa o levantamento das três dimensões fundamentais para o desenvolvimento humano, sendo: 1. Saúde/longevidade; 2. Educação; 3. Renda per capita. Ademais, um IDH elevado indica que o país está proporcionando bem-estar para a população e, também, investindo em capital humano.

Gráfico 5 – índice de Desenvolvimento Humano de 2008 a 2023



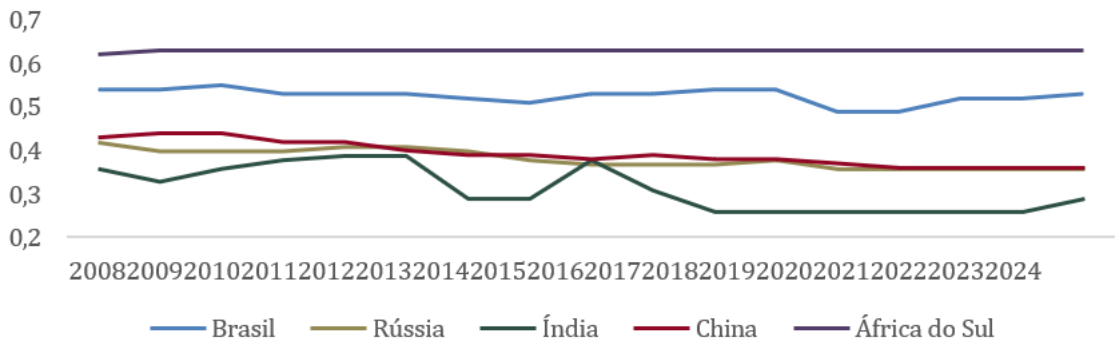
Fonte: Adaptado do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (2025)

Nota: Para fins de visualização gráfica, os valores do IDH – que variam de 0 a 1 – foram multiplicados por 1000, para assim permitir uma comparação visual das evoluções.

O gráfico 5 mostra que a Rússia lidera o IDH no BRICS ao longo de toda a série, reflexo de sistemas universais de educação e saúde herdados do período soviético. A China apresenta avanço acelerado, associado à expansão da infraestrutura social e redução da pobreza. O Brasil exibe níveis elevados, porém marcados por estagnação recente durante crises econômicas e sanitárias. A África do Sul cresce de forma contínua, ainda que lenta, enquanto a Índia mantém os menores índices devido às dificuldades de universalizar serviços básicos para uma população numerosa.

O Índice de Gini mede a desigualdade de renda, variando de 0 (igualdade perfeita) a 1 (máxima desigualdade), sendo particularmente relevante em economias emergentes, nas quais o crescimento econômico pode coexistir com fortes disparidades sociais na ausência de mecanismos de redistribuição

Gráfico 6 – Índice de Gini de 2008 a 2024



Fonte: Adaptado da Plataforma sobre Pobreza e Desigualdade do Banco Mundial (2025)

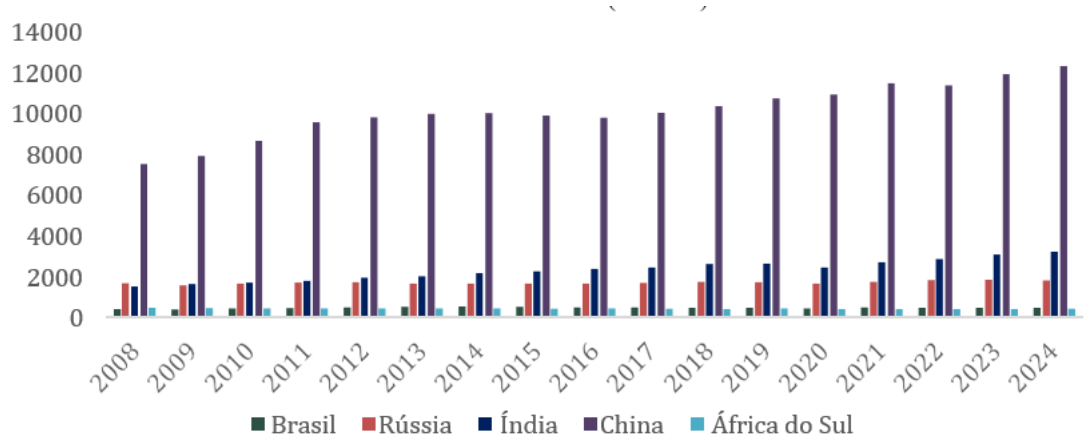
O gráfico 6 expresso acima indica o índice de Gini dos países da cooperação BRICS. Para iniciar, temos um caso bem crítico da África do Sul, que evidencia uma ampla desigualdade social e, também, uma estagnação, ou seja, sem melhorias ao longo do período analisado. Isso demonstra o quão enraizado os legados históricos estruturais que o crescimento econômico ainda não conseguiu dissolver. Entretanto, o Brasil não é muito diferente e expõe a fragilidade das políticas brasileiras para atenuar as desigualdades sociais do país, ainda que apresente oscilações ao longo do tempo. Já a Rússia, China e Índia apresentam índices significativamente menores (variando entre 0,20 e 0,40). Contudo, a China apresentou índices superiores em determinados períodos, efeito que pode estar relacionado à rápida industrialização e urbanização, mesmo tendo índices menores que o Brasil e África do Sul.

4.3 Pilar Ambiental

A expansão das fontes renováveis de energia tem ocupado posição crescente nas estratégias de mitigação das mudanças climáticas, uma vez que sua utilização contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a diversificação da matriz energética. Entre essas fontes, a energia solar fotovoltaica apresentou crescimento expressivo nos últimos anos, tanto em aplicações residenciais quanto em grandes unidades consumidoras, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e as emissões de dióxido de carbono (CO_2) (Bueno et al., 2026). Nesta seção, serão apresentados os principais dados do Pilar Ambiental, sendo eles as emissões de CO_2 (gás carbônico), exploração madeireira, floresta estável e consumo em energia renovável. Esses eixos são importantes para compreender as políticas que devem ser realizadas para mitigação das mudanças climáticas. Os dados em que serão apresentados foram obtidos nas plataformas virtuais Global Forest Watch, Global Carbon Atlas e The World Bank e, suas respectivas informações, foram avaliadas e aplicada a estatística descritiva para interpretação dos indicativos.

O indicador Emissões de gás carbônico (CO_2) quantifica a proporção de dióxido de carbono liberado na atmosfera (medido em $MtCO_2$) por cada país. Sendo um resultado direto da intensidade industrial e da dependência de combustíveis fósseis. É indispensável para analisar como cada país tem impactado no aquecimento global e nas mudanças climáticas.

Gráfico 7 – Emissões de CO_2 ($MtCO_2$) de 2008 a 2024



Fonte: Adaptado de Global Carbon Atlas (2025)

O gráfico 7 exibe um crescimento altíssimo e isolado das emissões chinesas durante todo o período analisado, ultrapassando a marca de 10.000 $MtCO_2$. Legitimando, assim, a posição chinesa como grande polo industrial do mundo, comprometendo as urgências ambientais. Comparados à China, o Brasil, Rússia, Índia e África do Sul aparecem com valores muito inferiores e mais estáveis.

A exploração madeireira medida em milhões de hectares (Mha), esse indicador relaciona-se à área de floresta que sofre com a intervenção para extração de madeira e, além disso, representa a pressão sobre os recursos naturais e a necessidade de políticas de preservação ambiental.

Quadro 1 – Exploração Madeireira (em Mha) de 2001 a 2024

País	Valor por Mha
Brasil	6.29
Rússia	19.8
Índia	0,182
China	9.67
África do Sul	1.27

Fonte: Adaptado de Global Forest Watch (2025)

O Quadro 1 aponta a Rússia lidera o eixo de exploração madereira com 19,8 Mha, apontando uma indústria madeireira intensiva. A China aparece em segundo lugar com 9,67 Mha. O Brasil ocupa a terceira posição com 6,29 Mha. Já a índia e África do Sul têm valores muito baixos (0,182 Mha e 1,27

Mha, respectivamente), indicando menor atividade madeireira ou menor disponibilidade de florestas para esse fim.

O indicador Floresta Estável refere-se à extensão de cobertura florestal que permaneceu preservada durante o período analisado (2000 a 2020), medida em Mha. Esse é um indicativo importante para a conservação da biodiversidade e da capacidade do país de armazenar seus estoques de carbono.

Quadro 2 – Floresta Estável (em Mha) de 2000 a 2020

País	Valor por Mha
Brasil	414 Mha
Rússia	686 Mha
Índia	59.2 Mha
China	202 Mha
África do Sul	5.80 Mha

Fonte: Adaptado de Global Forest Watch (2025)

No Quadro 2 expõe que a Rússia apresenta a maior área de floresta estável do bloco com 686 Mha, isso porque possui uma vasta extensão territorial (taiga siberiana). O Brasil se aloca em segundo lugar com 414 Mha, devido uma grande biodiversidade em todo o país. A China possui 202 Mha. A Índia apresenta 59,2 Mha. E a África do Sul tem a menor área de floresta estável, com apenas 5,80 Mha.

O BRICS tem apresentado um crescimento econômico que têm como um dos principais efeitos a melhoria no desenvolvimento tecnológico, que possibilita uma reforma no setor industrial (Danish et al., 2019). O uso intenso de combustíveis fósseis por todo o mundo, tanto nas economias em desenvolvimento como nas desenvolvidas, possui graves desafios ecológicos, como a desflorestação, a escassez de água e as alterações climáticas (Wu et al., 2017). Por consequência, os estudos indicam que o BRICS deve investir mais em energia sustentável para aquecer suas economias. Na tabela 1 será analisado o ranking de consumo em energia renovável entre os países fundadores do BRICS no ano de 2021.

Tabela 1 – Ranking de consumo em energia renovável do BRICS em 2021

Posição	País	Média (% do total)
1	Brasil	46,5
2	Índia	34,9
3	China	15,2
4	África do Sul	9,7

5	Rússia	3,5

Fonte: Adaptado de The World Bank (2025

A tabela 1 apresenta o consumo de energia renovável pelos países que constituem o bloco econômico BRICS, é notável que todos os países consomem menos de 50% da energia renovável. O Brasil que possui a maior biodiversidade do mundo – impulsionada pela Floresta Amazônica - é a nação apresenta maior consumo. Entretanto, a Rússia é o país que manifesta maiores dificuldades em assumir um processo de transição energética, devido os fatores climáticos. Contudo, os demais países, assim como o Brasil, também possuem alternativas mais diversificadas e menos obstáculos para adotar medidas mais sustentáveis em seus territórios.

4.4 Análise Triple Bottom Line

No Quadro 4, exposto abaixo apresentará os resultados da normalização dos dados do eixo Econômico de cada país pertencente ao BRICS.

Quadro 4 – Normalização dos dados do pilar Econômico

País	Norm. PIB (+)	Norm. PIB p/Capita (+)	Norm. Inflação (-)	Norm. Desemprego (-)	Índice Econômico
Brasil	0,131	0,365	0,189	0,736	**0,355**
Rússia	0,178	1	0,256	0,948	**0,596**
Índia	0,38	0	0	0,859	**0,31**
China	1	0,388	1	1	**0,847**
África do Sul	0	0,278	0,227	0	**0,126**

Fonte: Adaptado pelos autores (2025)

Nesse pilar a China exibe sua potência, apresentando nota máxima (1) no PIB e na inflação (menor do grupo), uma média de 0,847 no eixo econômico. Seu "ponto médio" é apenas na renda per capita, em que perde apenas para a Rússia que tem, também, ótimos índices de desemprego e uma média de 0,596. O Brasil revela uma estagnação e instabilidade econômica ocupando uma posição muito baixa. E, a África do Sul exibe o pior desempenho econômico com média de 0,126. Abaixo, será apresentado os dados normalizados do pilar Social dos países fundadores do bloco.

Quadro 5 – Normalização dos dados do pilar Social

País	Norm. IDH (+)	Norm. Gini (-)	Índice Social
Brasil	0,665	0,311	**0,488**
Rússia	1	0,744	**0,872**
Índia	0	1	**0,5**
China	0,623	0,726	**0,674**
África do Sul	0,372	0	**0,186**

Fonte: Adaptado pelos autores (2025)

A Rússia lidera o eixo, impulsionado, principalmente, pelo Índice de Desenvolvimento Humano com a média de 0,872 no pilar social. A China com 0,674 ocupa o segundo lugar com políticas de bem-estar ao longo do período analisado. A Índia tem uma interpretação delicada, isso porque apresenta o pior IDH do bloco e a menor desigualdade de renda, por isso a média de 0,500 não evidencia a péssima qualidade de vida geral. Novamente, com 0,186 a África do Sul se consolidou como o país com pior desempenho social da cooperação. Agora, será analisado o pilar Ambiental.

Quadro 6 – Normalização dos dados do pilar Ambiental

País	Norm. Madeira (-)	Norm. Floresta (+)	Norm. Energia Ren. (+)	Norm. CO_2 (-)	Índice Ambiental
Brasil	0,69	0,6	1	0,99	**0,82**
Rússia	0	1	0	0,89	**0,47**
Índia	1	0,08	0,73	0,78	**0,65**
China	0,52	0,29	0,27	0	**0,27**
África do Sul	0,94	0	0,14	1	**0,52**

Fonte: Adaptado pelos autores (2025)

No pilar Ambiental o Brasil é o destaque, isso porque é o maior consumidor de energia renovável e possui baixíssimas taxas de emissões de CO_2, com uma média de 0,820. A Índia vem em seguida com um desempenho médio de 0,650 por consequência de baixas emissões e exploração madeireiras, provocando valores altos na normalização. A Rússia tem um desempenho ruim, mas não se consolida como o pior do bloco, pois apesar das dificuldades de ampliar o consumo em energia renovável, apresenta uma área florestal estável muito grande, registrando uma média de 0,47. A China encontra-se na última posição com 0,27 por razões do baixo consumo em energia renovável, florestas e, principalmente o maior poluidor do mundo em emissões de CO_2. No próximo quadro é exposto o desempenho médio de cada país.

Quadro 7 – Resultado do Triple Bottom Line dos países pertencentes aos BRICS

País	Pilar Econômico	Pilar Social	Pilar Ambiental	*Triple Bottom Line* (TBL)
Brasil	0,355	0,488	0,82	**0,554**
Rússia	0,596	0,872	0,47	**0,646**
Índia	0,31	0,5	0,65	**0,487**
China	0,847	0,674	0,27	**0,597**
África do Sul	0,126	0,186	0,52	**0,277**

Fonte: Adaptado pelos autores (2025)

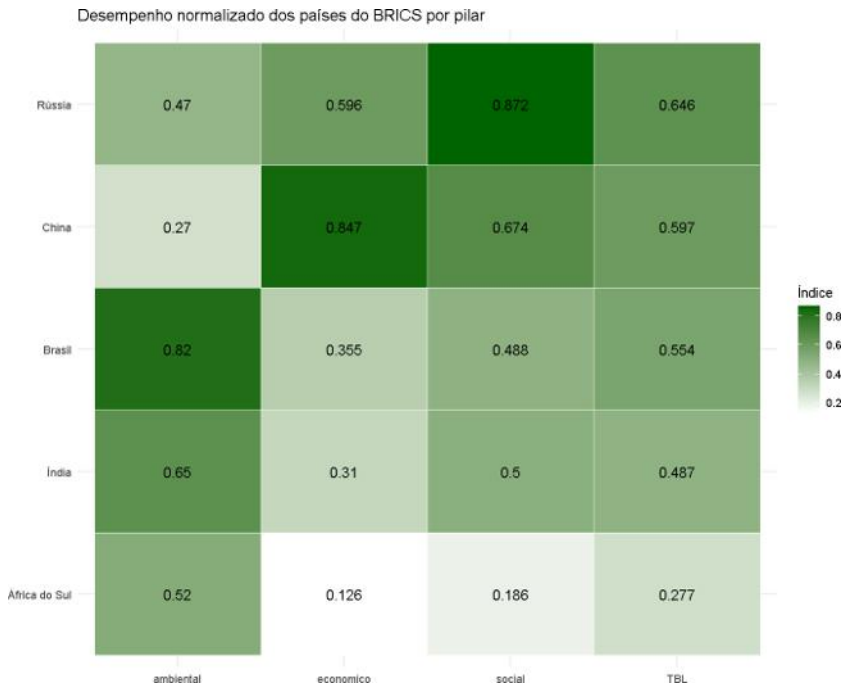
O Quadro 7 exibe a sintetização dos três pilares de cada país, e a Rússia se apresenta como o país mais equilibrado do bloco, ainda que não seja uma potência econômica apresenta bons resultados em todos os indicativos. A China, a maior potência econômica do bloco fica atrás com 0,597, pois apesar de ter o pior desempenho ambiental, é uma enorme potência econômica e o eixo social é bem equilibrado. Em terceiro lugar, o Brasil marca 0,554 no TBL, ainda que as políticas econômicas e sociais tenham suas fragilidades, o desempenho ambiental beneficia o país na média. Em seguida, a Índia sofre com seus indicadores sociais, mas a economia em expansão ao longo dos anos somado ao bom desempenho ambiental impede de registrar a quinta posição. E, por última, a África do Sul expõe uma realidade crítica, estando em último em dois eixos – econômico e social – sendo o mais vulnerável da cooperação.

Com isso, a aplicação do Triple Bottom Line revela que nenhum dos cinco países é plenamente desenvolvido em todos os pilares. A China, nitidamente, priorizou a economia em detrimento do planeta. O Brasil, em contrapartida, lidera a conservação ambiental, mas suas políticas para gerar prosperidade econômica e social são frágeis. A Rússia, apresenta o melhor equilíbrio, mas ainda têm grandes entraves para transição energética. Por fim, a África do Sul enfrenta desafios estruturais em todas as dimensões analisadas.

A Figura 2 apresenta o desempenho relativo dos países fundadores do BRICS após a normalização dos indicadores e a agregação segundo os três pilares do Triple Bottom Line (TBL). Observa-se que a China apresentou o maior índice econômico (0,847), reflexo da dimensão de sua economia e da estabilidade dos indicadores macroeconômicos considerados. Entretanto, esse resultado não se refletiu no pilar ambiental, no qual o país registrou o menor desempenho do grupo (0,270), indicando um desequilíbrio entre crescimento econômico e conservação ambiental. A Rússia, por sua vez, apresentou o maior índice social (0,872) e desempenho intermediário nos pilares econômico e ambiental, alcançando o

maior índice agregado de sustentabilidade (0,646). O Brasil destacou-se no pilar ambiental (0,820), impulsionado pela elevada participação de fontes renováveis na matriz energética e pela extensão de sua cobertura florestal, embora seus indicadores econômicos (0,355) e social (0,488) tenham reduzido sua posição no índice agregado. A Índia, como pode ser visto na figura, apresentou desempenho intermediário, combinando bons resultados ambientais com limitações nos pilares econômico e, principalmente, social. Por sua vez, a África do Sul registrou o menor índice agregado (0,277), consequência dos baixos resultados observados nos pilares econômico e social, apesar do desempenho ambiental relativamente superior ao da China.

Figura 2 – Desempenho normalizado dos pilares econômico, social e ambiental e índice agregado do Triple Bottom Line (TBL) para os países fundadores do BRICS

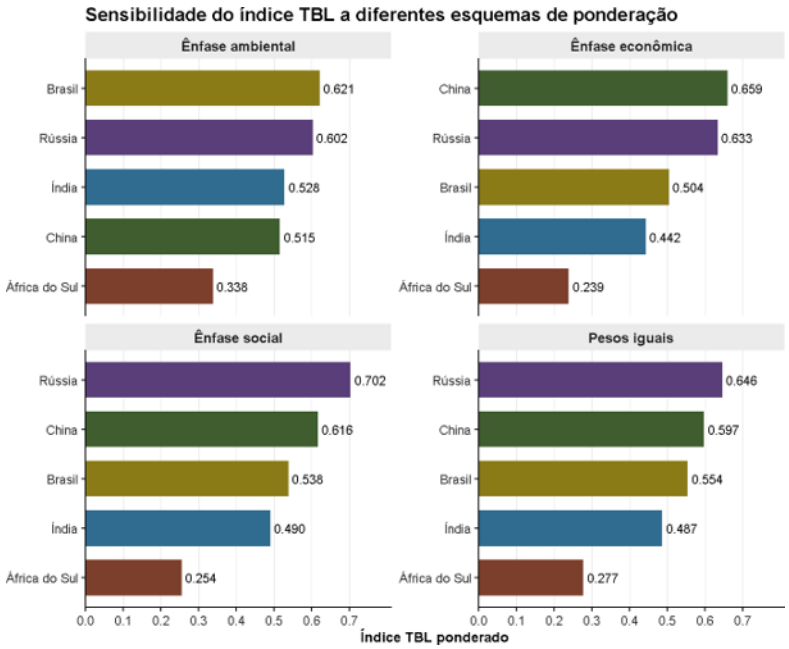


Fonte: Elaboração própria (2026)

Destaca-se que os resultados indicam que elevado desempenho em uma dimensão específica não implica, necessariamente, equilíbrio entre os demais pilares do Triple Bottom Line. A posição da China ilustra esse comportamento ao combinar liderança econômica com o menor desempenho ambiental do grupo, enquanto o Brasil apresenta a situação inversa. Em contraste, a Rússia obteve o maior índice agregado por manter resultados relativamente equilibrados entre os três pilares, sugerindo que o desenvolvimento sustentável depende menos da maximização de um único componente e mais da capacidade de reduzir assimetrias entre as dimensões econômica, social e ambiental.

Com o objetivo de avaliar a robustez do índice de sustentabilidade proposto, realizou-se uma análise de sensibilidade baseada em diferentes esquemas de ponderação dos pilares do Triple Bottom Line (TBL). Além do cenário de referência, no qual os pilares econômico, social e ambiental receberam pesos iguais, foram construídos três cenários alternativos, atribuindo maior peso, individualmente, a cada uma das dimensões analisadas. O resultado pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Análise de sensibilidade do índice Triple Bottom Line (TBL) sob diferentes esquemas de ponderação dos pilares econômico, social e ambiental

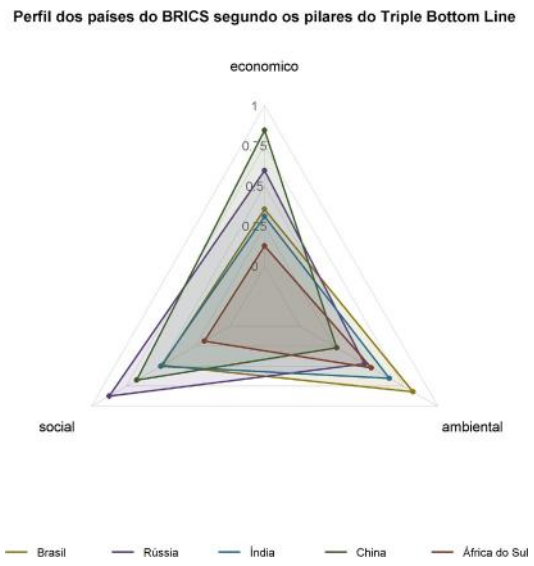


Fonte: Elaboração própria (2026)

Como pode ser observado na Figura 3, os resultados evidenciam que o índice apresentou estabilidade frente às alterações nos pesos atribuídos aos pilares. A Rússia permaneceu na primeira posição nos cenários de pesos iguais e de ênfase social, refletindo o elevado desempenho observado nessa dimensão e resultados relativamente equilibrados nos demais pilares. Quando a dimensão econômica recebeu maior ponderação, a China assumiu a liderança, resultado compatível com seu maior índice econômico entre os países analisados. De forma semelhante, ao atribuir maior peso ao componente ambiental, o Brasil passou a ocupar a primeira posição, impulsionado pelo melhor desempenho ambiental do grupo. A Índia manteve a quarta colocação em todos os cenários, enquanto a África do Sul permaneceu na última posição, indicando que seu desempenho relativo mostrou baixa sensibilidade às diferentes estruturas de ponderação.

A Figura 4 apresenta a distribuição dos índices normalizados dos pilares econômico, social e ambiental para os países fundadores do BRICS. Observa-se que nenhum dos países apresentou configuração homogênea entre as três dimensões, evidenciando diferenças na forma como o desenvolvimento foi alcançado. A China destacou-se no pilar econômico, enquanto apresentou o menor índice ambiental do grupo, indicando elevada assimetria entre crescimento econômico e preservação ambiental. O Brasil exibiu comportamento oposto, registrando o maior desempenho ambiental, porém com índices inferiores nas dimensões econômica e social. A Rússia apresentou o maior índice social e valores intermediários nos demais pilares, resultando em uma configuração relativamente mais equilibrada. A Índia apresentou distribuição mais uniforme entre as três dimensões, sem predominância acentuada de qualquer pilar, ao passo que a África do Sul registrou os menores índices econômico e social, mantendo desempenho ambiental relativamente superior aos observados nesses dois componentes.

Figura 4 - Perfil comparativo dos países fundadores do BRICS segundo os pilares econômico, social e ambiental do Triple Bottom Line (TBL)



Fonte: Elaboração própria (2026)

4.4.1 Análise do equilíbrio entre os pilares do Triple Bottom Line

Embora o índice TBL sintetize o desempenho médio dos pilares econômico, social e ambiental, ele não evidencia o grau de equilíbrio existente entre essas dimensões. Um país pode apresentar elevado índice agregado em razão do desempenho expressivo em apenas um dos pilares, enquanto outro pode obter valor semelhante mantendo resultados mais homogêneos entre as três dimensões. Com o objetivo de complementar essa análise, foi calculada uma medida de equilíbrio baseada na dispersão

dos pilares, definida como um menos o desvio-padrão dos índices econômico, social e ambiental. Temos que $Balancei = 1 - sd(Ei, Si, Ai)$, no qual Ei equivale ao índice econômico; Si o índice social e Ai o índice ambiental. Os Resutaldos encontrassem na Tabela 2.

Tabela 2 – Índice Triple Bottom Line (TBL) e indicador de equilíbrio entre os pilares econômico, social e ambiental dos países fundadores do BRICS

País	Econômico	Social	Ambiental	TBL	Equilíbrio
Índia	0.310	0.500	0.650	0.487	0.830
Rússia	0.596	0.872	0.470	0.646	0.794
África do Sul	0.126	0.186	0.520	0.277	0.788
Brasil	0.355	0.488	0.820	0.554	0.761
China	0.847	0.674	0.270	0.597	0.704

Fonte: Elaboração própria (2026)

A Tabela 2 apresenta os índices normalizados dos pilares econômico, social e ambiental, o índice agregado do Triple Bottom Line (TBL) e o indicador de equilíbrio entre as dimensões para os países fundadores do BRICS. Enquanto o índice TBL sintetiza o desempenho médio das três dimensões da sustentabilidade, o indicador de equilíbrio complementa essa análise ao mensurar o grau de homogeneidade entre os pilares, permitindo identificar se o desempenho agregado resulta de uma distribuição relativamente uniforme ou da predominância de uma dimensão específica. Os resultados mostram que a Rússia apresentou o maior índice TBL (0,646), seguida pela China (0,597) e pelo Brasil (0,554). Entretanto, a análise do indicador de equilíbrio revelou uma dinâmica distinta. A Índia apresentou o maior grau de equilíbrio entre os pilares (0,830), indicando menor dispersão entre as dimensões econômica, social e ambiental, apesar de ocupar apenas a quarta posição no índice agregado. Em contraste, a China registrou o menor indicador de equilíbrio (0,704), refletindo a elevada discrepância entre seu elevado índice econômico (0,847) e seu reduzido índice ambiental (0,270). O Brasil também apresentou desequilíbrio relativamente maior em razão do elevado desempenho ambiental (0,820) associado a índices inferiores nas dimensões econômica e social.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo analisou o desempenho dos países pertencentes aos BRICS sob a perspectiva do Triple Bottom Line (TBL), utilizando como metodologia a análise bibliográfica, a estatística descritiva e a normalização (Min-Max) de indicadores macroeconômicos, sociais e ambientais. Os resultados

expressam que, apesar da relevância geopolítica e econômica do bloco, há uma heterogeneidade significativa no desenvolvimento interno de seus membros e, assim, expondo que nenhum dos países avaliados alcançou a prosperidade do tripé da sustentabilidade.

A aplicação do TBL indicou assimetrias nas estratégias de desenvolvimento nacional. A China se consolido como a hegemonia econômica da cooperação, entretanto, esse peso custou o desenvolvimento ambiental, posicionando o país com o pior desempenho devido às massivas de emissões de CO_2. Todavia, o Brasil destacou-se pela liderança no pilar ambiental, pelo desenvolvimento sustentável, impulsionada pela matriz energética renovável e cobertura florestal, mas demonstrou enormes vulnerabilidades estruturais para o avanço de políticas que possam atenuar os problemas econômicos e sociais do país.

Destaca-se que enquanto o índice TBL sintetizou o desempenho médio dos países, o indicador de equilíbrio entre os pilares possibilitou avaliar o grau de homogeneidade entre as dimensões econômica, social e ambiental, evidenciando que elevados índices agregados não implicam, necessariamente, maior equilíbrio entre os componentes da sustentabilidade. Adicionalmente, o heatmap e o gráfico radar permitiram visualizar os diferentes perfis de desenvolvimento dos países do BRICS, destacando as assimetrias existentes entre os pilares e facilitando a comparação entre as economias analisadas.

Os testes de sensibilidade corroboraram essa interpretação ao demonstrar que as posições relativas dos países permaneceram relativamente estáveis diante de diferentes estruturas de ponderação. A Rússia manteve a liderança na maior parte dos cenários avaliados, refletindo a distribuição mais equilibrada de seus indicadores, enquanto a China assumiu a primeira posição quando a dimensão econômica recebeu maior peso e o Brasil liderou no cenário de maior ponderação ambiental. A Índia e a África do Sul apresentaram alterações pouco expressivas em sua posição relativa, indicando que seus resultados mostraram baixa sensibilidade às mudanças nos pesos atribuídos aos pilares.

Destaca-se que a incorporação do indicador de equilíbrio entre os pilares permitiu ampliar a interpretação do índice agregado do Triple Bottom Line, demonstrando que elevados níveis de sustentabilidade não necessariamente estão associados a uma distribuição homogênea entre as dimensões econômica, social e ambiental. Embora a Rússia tenha apresentado o maior índice TBL, a Índia registrou o maior grau de equilíbrio entre os pilares, indicando maior homogeneidade entre as dimensões analisadas. Em contrapartida, a China apresentou elevada assimetria, resultado do

contraste entre seu elevado desempenho econômico e seu menor desempenho ambiental, enquanto o Brasil destacou-se pelo elevado índice ambiental, acompanhado de resultados inferiores nas dimensões econômica e social.

REFERÊNCIAS

BATISTA JUNIOR, Paulo Nogueira. Brics–Novo Banco de Desenvolvimento. Estudos Avançados, v. 30, n. 88, p. 179-184, 2016.

BRASIL. Governo Federal. Ministério das Relações Exteriores. Brasília, DF: Governo Federal, 06 mar. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/mre/pt-br/assuntos/mecanismos-internacionais/mecanismos-inter-regionais/brics. Acesso em: 17 nov. 2025.

BRASIL. Presidência da República. Decreto nº 8.702, de 1º de abril de 2016. Promulga o Tratado para o Estabelecimento do Arranjo Contingente de Reservas dos BRICS, de 15 de julho de 2014. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/decreto/d8702.htm. Acesso em: 17 nov. 2025.

BUENO, P. C. DOS S.; BUENO, B. DOS S.; CARRATORE, C. R. D.; COSTA, I. B. DA; DIAS, J. A.; ANDREOTTI, L. DE C.; SERVA, F. M. Energia fotovoltaica em ambiente universitário e hospitalar: viabilidade econômica, impacto ambiental e contribuição para a transição energética sustentável no Brasil. Revista EdUCA - Revista Multidisciplinar Da Faculdade Católica Paulista, 9(2), e270, 2026.

CANUTO, Otaviano; SARAIVA, Bruna. BRICS em tempos de reacomodação tectônica: agenda do grupo no atual contexto geopolítico desafiador. Revista do CEBRI, n. 13, jan./mar. 2025.

DANISH, B.; BALOCH, M. A.; MAHMOOD, N.; ZHANG, J. W. Effect of natural resources, renewable energy and economic development on CO_2 emissions in BRICS countries. Science of The Total Environment, p. 632-638, 2019.

ELKINGTON, J. The triple bottom line. In: Environmental Management: Readings and Cases. 2 ed., p. 49-66, 1997.

GUPTA, R., ROUTROY, S., CHHETRI, P., SAHU, P., e NKHOMA, M. Analyzing India's public distribution network: a triple-bottom-line approach. Journal of International Logistics and Trade, 23(1), 56-77. 2025.

MALEFAKI, S., MARKATOS, D., FILIPPATOS, A., e PANTELAKIS, S. A comparative analysis of Multi-Criteria Decision-Making methods and normalization techniques in holistic sustainability assessment for engineering applications. Aerospace, 12(2), 100.2025.

MORAIS, C. Escalas de medida, estatística descritiva e inferência estatística. 2005.

QI, X.; YANG, Z. Drivers of green innovation in BRICS countries: exploring tripple bottom line theory. Economic Research – Ekonomska Istraživanja, v. 36, n. 3, art. 2150670, 2023.

RALSTON, D. A. et al. The triple-bottom-line of corporate responsibility: assessing the attitudes of present and future business professionals across the BRICs. Asia Pacific Journal of Management, p. 1-26, 2014.

ROGERS, K.; HUDSON, B. The triple bottom line. OD Practitioner, v. 43, n. 4, p. 4, 2011.

SAMPAIO, M. de S. R.; OLIVEIRA, H. C. de. Análise da adoção de moedas locais no comércio de bens do Brasil com os demais membros fundadores do BRICS no período de 2009-2024. Repositório Universitário da Ânima (RUNA), 2024.

SALACHE, L. A., RIBAS, A. J. F., SALACHE, C. F., SCHWANS, A., SCHWANS, S. K., e REGIANI, R. C. D. Os países do BRICS: principais desafios e projeção no cenário político e econômico internacional contemporâneo. Revista EdUCA - Revista Multidisciplinar Da Faculdade Católica Paulista, 9(2), e242, 2026. TERRA, F. H. B.; DEUS, L. N. de; DE CONTI, B. M. O banco dos BRICS e seus desdobramentos sobre as assimetrias do sistema monetário e financeiro internacional: apreciações preliminares. Anais Sociedade Brasileira de Economia Política (SEP), 2018.

URBAN, B.; HWINDINGWI, R. The influence of institutional factors on MNC's triple bottom-line reporting: a focus on African emerging markets (AEMs). International Journal of Emerging Markets, v. 11, n. 4, p. 497-513, 2016.

WISE, N. Eventful futures and Triple Bottom Line impacts: BRICS, image regeneration and competitiveness. Journal of Place Management and Development, v. 13, n. 1, p. 89-100, 2020.

WU, R.; GENG, Y.; LIU, W. Trends of natural resource footprints in the BRIC (Brazil, Russia, India and China) countries. Journal of Cleaner Production, Part 2, p. 775-782, 2017.

Capítulo 10

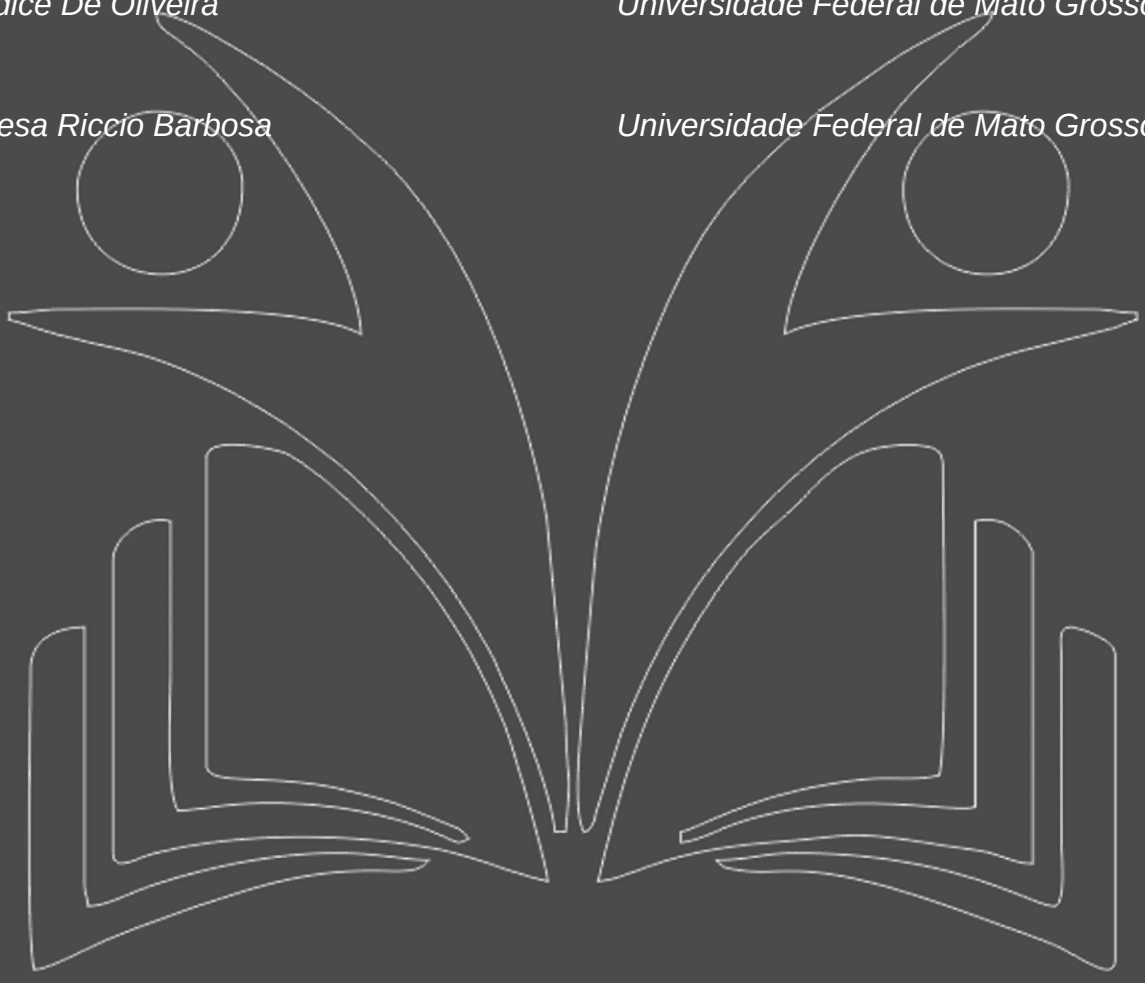
10.37423/260911372

GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS: UMA ABORDAGEM ECONÔMICO-AMBIENTAL

Rafaella de Deus Panassolo — *Universidade Federal de Mato Grosso do Sul*

Sandro Medice De Oliveira — *Universidade Federal de Mato Grosso do Sul*

Andrea Teresa Riccio Barbosa — *Universidade Federal de Mato Grosso do Sul*



RESUMO

Este artigodiscute a viabilidade econômica e os impactosambientais da geração de energia a partir do biogás gerado em aterros sanitários, com ênfase em experiências brasileiras recentes e na aplicação de modelos de predição de metano como o LandGEM e o CETESB. A pesquisa realiza uma revisão teórica sobre as tecnologias de aproveitamento energético do biogás, os benefícios ambientais advindos da redução de gases de efeito estufa, e a análise econômica considerando fatores como custos de implantação, operação e receita por venda de energia e créditos de carbono. A abordagem foi baseada em dados secundários provenientes de estudos de caso nacionais e internacionais. Conclui-se que o aproveitamento energético do biogás é uma alternativa viável tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, especialmente quando associados aos instrumentos de mercado de carbono e às políticas de incentivo às fontes renováveis.

PALAVRAS-CHAVE: biogás, aterros sanitários, energia renovável, viabilidade econômica, impacto ambiental.

1 INTRODUÇÃO

O problema dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) apresenta-se como um dos principais desafios socioambientais nas áreas urbanas. A disposição inadequada dos resíduos, especialmente em aterros mal projetados ou lixões, resulta na Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), sobretudo o metano (CH_4), que tem Potencial de Aquecimento Global (GWP) muito superior ao do dióxido de carbono (CO_2), sendo estimado em torno de 29 a 30 vezes maior em uma escala de 100 anos e 86 vezes maior em 20 anos. Além disso, os aterros são reconhecidos como a terceira maior fonte de emissão de metano globalmente, contribuindo com cerca de 18% das emissões antropogênicas de CH_4.

Paralelamente, a crescente demanda global por energia, impulsionada pelo desenvolvimento econômico e aumento populacional, tem pressionado as reservas finitas de combustíveis fósseis, como petróleo, gás natural e carvão mineral. A exploração intensiva desses recursos naturais não renováveis gera impactos ambientais severos, como poluição atmosférica, degradação ambiental e acentuadas emissões de gases que agravam o efeito estufa. Diante dessa realidade, a adoção de fontes renováveis como o biogás permite não apenas reduzir a pressão sobre recursos fósseis, mas também explorar uma solução localmente disponível e alinhada à realidade dos municípios brasileiros.

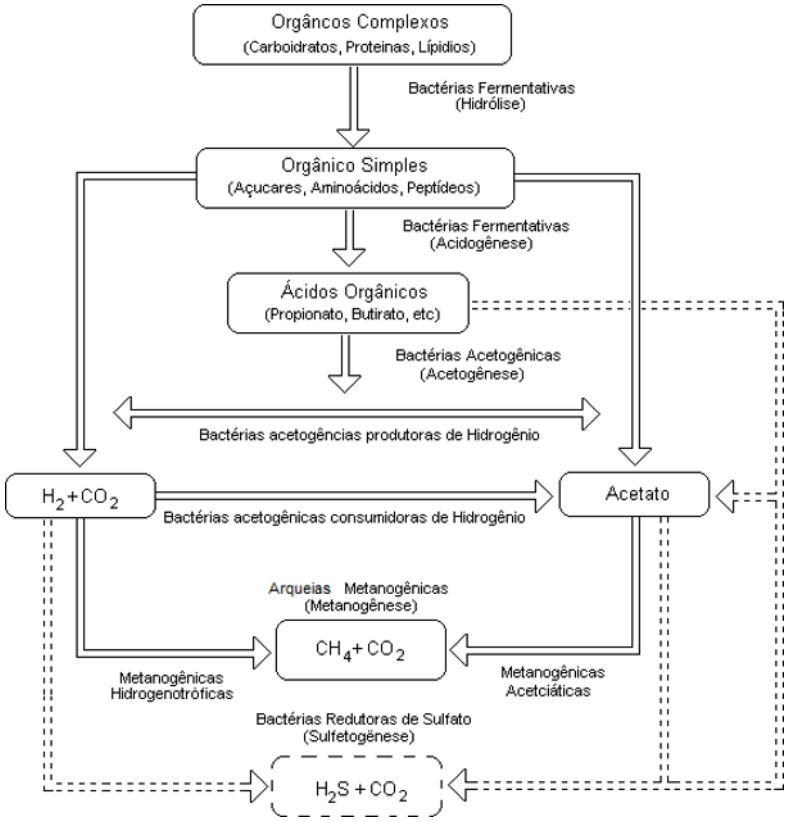
O biogás gerado em aterros sanitários configura-se como uma alternativa estratégica e promissora para diversificação e sustentabilidade da matriz energética brasileira. Trata-se de uma mistura gasosa composta majoritariamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de traços de sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3) e vapor d'água. Esse biogás é produzido por meio da digestão anaeróbia da matéria orgânica presente nos Resíduos Sólidos Urbanos (RSUs), um processo biológico conduzido por diferentes grupos de microrganismos em ambiente anóxico (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011).

A digestão anaeróbia ocorre em quatro etapas metabólicas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Na hidrólise, macromoléculas como carboidratos, proteínas e lipídios são degradadas em moléculas menores, como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos. Durante a acidogênese, esses produtos são fermentados por bactérias acidogênicas, originando ácidos voláteis, álcoois, H_2 e CO_2. A etapa seguinte, acetogênese, envolve a conversão desses compostos em acetato, além de H_2 e CO_2, por ação de bactérias acetogênicas. Finalmente, na metanogênese, arqueias metanogênicas utilizam acetato ou a combinação de H_2 + CO_2 como substrato para a produção de metano (ANGELIDAKI; ELLEGAARD; AKERSON, 2002).

Paralelamente, podem ocorrer vias metabólicas indesejáveis, como a sulfetogênese, na qual bactérias redutoras de sulfato competem com as arqueias metanogênicas pelo H_2, resultando na formação de sulfeto de hidrogênio (H_2S), composto tóxico e corrosivo que compromete a qualidade do biogás (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011). A estabilidade e a eficiência do processo dependem da interação sinérgica entre os diferentes grupos microbianos e de condições ambientais como temperatura, pH e tempo de retenção.

Para ilustrar as etapas envolvidas na geração do biogás a partir da decomposição da matéria orgânica, apresenta-se a Figura 1, que esquematiza o processo de digestão anaeróbia, destacando os microrganismos atuantes em cada fase e os principais produtos formados ao longo da conversão.

FIGURA 1: Esquema simplificado do processo de digestão anaeróbia.



Fonte: Adaptado de CHERNICHARO (1997).

No Brasil, segundo levantamento do CIBiogás, até o final de 2018 havia aproximadamente 276 plantas de biogás em operação, sendo 77 delas localizadas em aterros sanitários, com uma capacidade instalada total de cerca de 137 MW, considerando todas as fontes (resíduos sólidos urbanos, esgoto e setor agropecuário) (CIBIOGÁS, 2020). Estudos anteriores, como o de Rodrigues e Martins (2009), já apontavam que o potencial técnico nacional poderia variar entre 440 e 1.480 MW, a depender das

condições de viabilidade técnica e regulatória. Mais recentemente, Ki rsten (2023) estimou que, se houvesse aproveitamento integral dos resíduos sólidos urbanos com infraestrutura adequada, o Brasil poderia alcançar até 2.564 MW de potência instalada em unidades de geração a partir de biogás de aterro. Esse potencial indica uma oportunidade relevante para contribuir na ampliação da participação das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, diversificando a produção e reduzindo a dependência dos combustíveis fósseis.

Além de sua relevância como fonte complementar na matriz energética brasileira, o biogás apresenta elevado potencial para aplicações em cogeração de energia, ou geração combinada de energia elétrica e térmica (CHP, na sigla em inglês). Essa modalidade permite o aproveitamento do calor residual gerado durante o processo de conversão energética, resultando em uma eficiência global significativamente superior, que pode ultrapassar 80%, enquanto sistemas convencionais de geração elétrica isolada operam com eficiências entre 30% e 40% (CLARKE ENERGY, 2013; ENERGYPEDIA, 2022).

Nos aterros sanitários, a captura e o aproveitamento energético do biogás podem ser integrados a diferentes ciclos termodinâmicos para a geração de energia. Entre os mais utilizados estão o ciclo Rankine, particularmente o Ciclo Rankine orgânico (ORC), que opera com fluidos de trabalho adequados a temperaturas mais baixas, e o ciclo Brayton, quando se busca uma conversão direta via turbinas a gás. O ciclo Rankine, por exemplo, permite a recuperação do calor gerado na combustão do biogás para geração simultânea de eletricidade e calor útil, aumentando o rendimento do sistema. Adicionalmente, estratégias de melhoria como o uso de trocadores de calor de alta eficiência, regeneradores térmicos e integração com sistemas de absorção para refrigeração (trigeração) ampliam ainda mais os benefícios energéticos.

A valorização energética dos resíduos sólidos por meio da cogeração com biogás traz impactos ambientais e econômicos expressivos. Ambientalmente, a substituição de fontes fósseis para geração térmica, como óleo combustível ou carvão mineral, por calor proveniente do biogás reduz diretamente as emissões de CO_2 e outros poluentes atmosféricos. Em setores industriais e em redes de aquecimento distrital, essa substituição contribui de forma concreta para metas de descarbonização e melhoria da qualidade do ar. Do ponto de vista econômico, a cogeração permite redução de custos operacionais com energia, gera receita por venda de excedentes elétricos e pode ser integrada a mecanismos de incentivo, como créditos de carbono e tarifas incentivadas para energia limpa.

1.1 Objetivos

Este artigo tem como objetivo geral analisar o potencial de geração de energia a partir do biogás oriundo de aterros sanitários no Brasil, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais, com foco na valorização energética dos resíduos sólidos e sua contribuição para a matriz energética renovável.

E para os objetivos específicos o artigo busca analisar a geração de energia a partir do biogás em aterros brasileiros, com foco em três frentes principais: (i) caracterização das tecnologias de conversão aplicadas ao contexto nacional; (ii) análise comparativa entre modelos de estimativa de produção de metano; e (iii) avaliação econômica com base em indicadores como LCOE e VPL, considerando o cenário regulatório brasileiro.

1.2 Justificativas

Apesar dos avanços em tecnologias limpas e do crescente debate sobre economia circular, o aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários brasileiros permanece subutilizado. Essa lacuna evidencia não apenas a ausência de investimentos consolidados no setor, mas também uma carência de estudos técnico-científicos que ofereçam análises integradas da viabilidade ambiental e econômica dessa alternativa. Considerando a baixa adoção de sistemas de cogeração com biogás no Brasil, especialmente em cidades de médio porte, este estudo contribui ao discutir barreiras operacionais, financeiras e tecnológicas que dificultam a implantação de projetos. O aprofundamento em estudos de caso nacionais fornece subsídios práticos à formulação de políticas públicas.

O biogás, por suas características físico-químicas e pela regularidade de sua geração nos aterros, configura-se como uma fonte renovável promissora para aplicação em sistemas de cogeração, com vantagens comparativas tanto na produção de eletricidade quanto no fornecimento de energia térmica. Contudo, sua adoção em larga escala depende de um melhor entendimento dos fatores que afetam sua viabilidade técnico-econômica, da análise dos modelos mais adequados de conversão energética e da quantificação dos benefícios ambientais associados à sua implementação.

Assim, este estudo justifica-se pela necessidade de ampliar o conhecimento sobre o aproveitamento energético do biogás sob uma perspectiva multidimensional, oferecendo subsídios consistentes para políticas públicas, planejamento urbano, marcos regulatórios e decisões de investimento. Ao integrar

aspectos tecnológicos, ambientais e econômicos, a pesquisa contribui para preencher uma lacuna crítica na literatura acadêmica e para fomentar estratégias sustentáveis de valorização dos resíduos sólidos no contexto brasileiro.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente artigo apoia-se em revisão bibliográfica exploratória, abrangendo estudos científicos, relatórios técnicos e bases oficiais. Entre os artigos científicos consultados destacam-se: Dantas, Chaves e Pires (2021), que estimam o potencial energético do biogás gerado em aterro sanitário no Ceará com modelagem detalhada e vazão média de metano compatível com grandes aterros; Menon de Lima & Nagel Schirmer (2024), que analisam teoricamente o aproveitamento da fração orgânica de RSU para geração de biogás e biometano no Brasil; e SciELO (2022-2024), que compara os modelos LandGEM (EPA) e Biogás (CETESB) para estimativa de energia elétrica a partir da produção de biogás em aterros sanitários brasileiros. Também foi utilizada pesquisa do Consórcio do Maciço de Baturité (Ceará), estimando potência de 460 kW e geração anual de aproximadamente 3,22 GWh com o modelo LandGEM e análise econômica comparativa com digestão anaeróbia.

Quanto a relatórios técnicos e bases de dados, consultou-se: o relatório “Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023”, da ABREMA (2024), que informa geração de 77,1 milhões de toneladas de RSU em 2022, com apenas 44 milhões de toneladas dispostas em aterros sanitários e o restante em lixões, e quantifica a produção atual de biogás em cerca de 5,6 milhões m³/dia, potenciais para até 1 milhão de m³ de biometano/dia; além de fontes governamentais que descrevem os princípios de decomposição anaeróbia, composição do biogás (CH_4 e CO_2) e fatores que influenciam sua geração, segundo o MMA/Política Nacional de Resíduos Sólidos (2022).

Os dados econômicos foram extraídos de estudos de caso recentes: o projeto de recuperação de biogás no Ceará (Dantas et al., 2021) apresentou estimativas de geração e rendimento energético; o cenário do Consórcio de Baturité (Menon de Lima & Nagel Schirmer, 2024) trouxe detalhamento do custo por kWh usando análise de LCOE e VPL, com viabilidade econômica comparada aos sistemas de digestão anaeróbia.

A análise técnica inclui estimativas de geração de metano e conversão em energia elétrica com base no modelo LandGEM da EPA, com parâmetros adaptados à realidade brasileira conforme os estudos de Dantas et al. (2021), Menon de Lima & Nagel Schirmer (2024), e aplicação anterior em Campinas/SP

que apresenta projeções de metano de cerca de 15,79 milhões m³ em 2024 (com total de gás previsto de 28,65 milhões m³ até o referido ano). A metodologia segue as diretrizes do IPCC (2006) e do modelo LandGEM (EPA), com constantes de decaimento e composição conforme literatura técnica internacional e nacional.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A geração de energia a partir do biogás oriundo de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em aterros sanitários tem se consolidado como uma alternativa promissora dentro da matriz energética renovável, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil. Estudos recentes têm evidenciado o elevado potencial energético do biogás gerado em aterros de médio e grande porte, com vazões médias de metano compatíveis com sistemas de cogeração elétrica e térmica. Estimativas realizadas com base em modelagens específicas demonstram que a geração elétrica pode ultrapassar os 3 GWh anuais em empreendimentos regionais, como consórcios intermunicipais, com potências da ordem de 460 kW (Dantas et al., 2021; Consórcio Maciço de Baturité, 2023).

Outro aspecto relevante abordado na literatura é a análise do aproveitamento da fração orgânica dos RSU em sistemas de digestão anaeróbia, alternativa que permite maior controle operacional e produção de biogás de qualidade mais estável. Essa abordagem favorece a descentralização da geração, especialmente em municípios com estrutura limitada para implantação de grandes aterros, e pode ser integrada a políticas de compostagem e separação na origem, promovendo a circularidade dos resíduos urbanos (Menon de Lima & Schirmer, 2024).

No que tange às metodologias de estimativa, a comparação entre modelos como o LandGEM (desenvolvido pela EPA) e o modelo Biogás (da CETESB) tem gerado avanços significativos na previsão da produção de metano. Enquanto o primeiro adota parâmetros mais conservadores e generalistas, que podem superestimar a produção em contextos tropicais, o segundo incorpora fatores regionais e características específicas dos resíduos brasileiros, resultando em maior precisão em análises locais. A escolha do modelo influencia diretamente o dimensionamento dos sistemas de captação e queima, bem como os estudos de viabilidade econômica (SciELO, 2022; 2024). Os dois modelos matemáticos utilizados estão descritos na Equação 1 e na Equação 2.

Equação 1, Modelo de geração LandGEM (EPA, 2005):

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0,1}^{1} KL_0 \left(\frac{M_t}{10}\right) e^{-kt_{i,j}} \quad (1)$$

Onde:

Q_{CH4} = geração anual de metano no ano do cálculo (m3/ano); i = incremento de tempo de 1 ano;n = (ano do cálculo) - (ano inicial do cálculo);

j = incremento de tempo de 0,1 ano;

k = taxa de geração de metano;

L_o = capacidade potencial de geração de metano (m3/Mg);

M_t = massa de resíduos aceitada do enésimo ano Mg;

$T_{i,j}$ = idade da j-ésima seção de massa de resíduo Mi, aceita no enésimo ano (anos em número decimal, p. ex. 3,2 anos).

Equação 2, Modelo de geração Biogás (CETESB, 2006):

$$\sum Q_x = KL_0 \sum (R_X \, e^{-k(X-T)}) \quad (2)$$

Onde:

Q_x = vazão de metano (m3 CH4/ano); k = constante de decaimento (1/ano);

L_o = potencial de geração de biogás (m3/kg);

R_x = fluxo de resíduos (t/ano);

x = ano atual;

T = ano de deposição do resíduo.

Estudos com simulações energéticas revelam que um aterro sanitário de médio porte, recebendo aproximadamente 200 toneladas de RSU por dia, pode gerar de 300 a 600 Nm³ de metano por hora, resultando em potências instaladas entre 400 e 800 kW.

Do ponto de vista econômico, estudos de caso demonstram que a geração distribuída com biogás pode se tornar competitiva, principalmente quando associada a incentivos fiscais, tarifas especiais de energia renovável, e mecanismos de comercialização como o mercado de créditos de carbono. A digestão anaeróbia também apresenta viabilidade crescente em função da redução dos custos de tecnologias e do aumento da demanda por biocombustíveis como o biometano.

A adoção de políticas públicas baseadas na Lei Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), associadas a instrumentos econômicos como o Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020), pode ampliar significativamente a viabilidade técnica e econômica desses projetos. Ainda assim, persistem barreiras institucionais e técnicas que precisam ser superadas, como a ausência de dados confiáveis, dificuldade de acesso a financiamentos e carência de capacitação local.

A gestão de RSU no Brasil ainda apresenta um panorama preocupante em relação à disposição adequada e ao aproveitamento energético. Dados recentes indicam que, em 2022, foram geradas aproximadamente 77,1 milhões de toneladas de RSU no país. No entanto, apenas cerca de 57% desse total foi destinado a aterros sanitários, enquanto o restante teve como destino lixões ou locais inadequados, comprometendo o potencial de recuperação energética e aumentando os impactos ambientais associados à liberação descontrolada de metano.

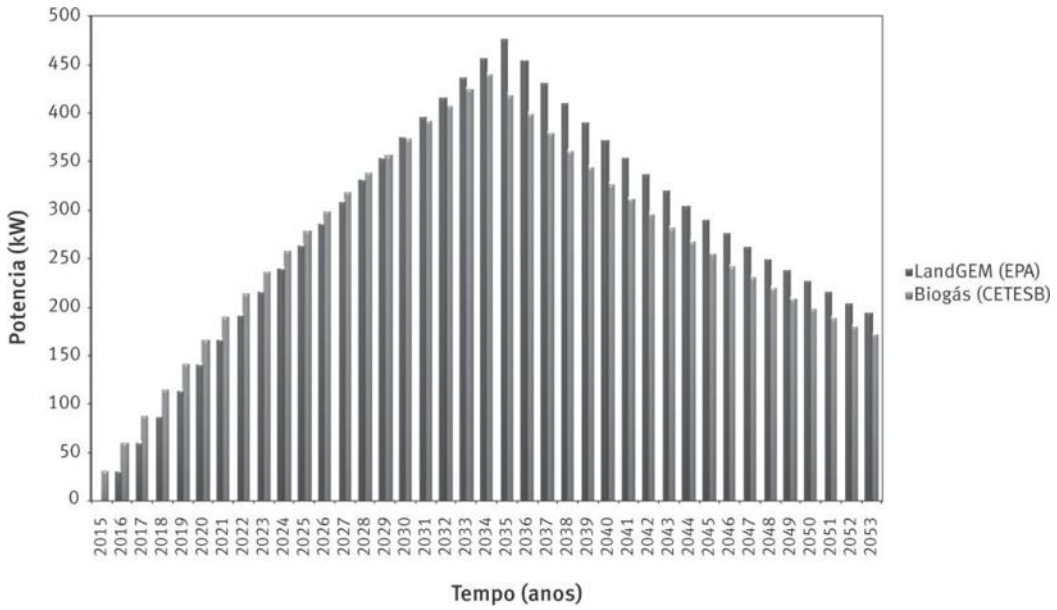
Apesar desse cenário, o país apresenta um potencial expressivo para geração de biogás. A produção atual gira em torno de 5,6 milhões de metros cúbicos por dia, com possibilidade técnica de refino para aproximadamente 1 milhão de metros cúbicos de biometano diariamente. Esse potencial, se plenamente aproveitado, contribuiria significativamente para a diversificação da matriz energética nacional, com ganhos ambientais expressivos relacionados à mitigação das Emissões de Gases de Efeito Estufa.

Do ponto de vista técnico, a geração de biogás ocorre por meio do processo de decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos, que resulta majoritariamente na liberação de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de traços de outros compostos. A taxa de geração de metano depende de múltiplos fatores, como a composição dos resíduos, umidade, temperatura, tempo de residência e cobertura do aterro. Modelos matemáticos de predição, como o LandGEM (EPA), vêm sendo utilizados para estimar a produção de gás em aterros sanitários, considerando parâmetros como constante de decaimento (k) e potencial de geração de metano (L_o), com adaptações para a realidade brasileira a partir de dados locais.

Aplicações recentes do modelo LandGEM em cenários brasileiros mostram resultados expressivos. Por exemplo, simulações para aterros de médio porte indicam produção acumulada de cerca de 28,65 milhões de m³ de biogás até o ano de 2024, com picos anuais próximos de 15,79 milhões de m³. Tais estimativas reforçam a necessidade de estruturação de políticas públicas e investimentos em infraestrutura para captação, purificação e uso energético desse recurso. Um exemplo representativo é o estudo aplicado ao município de Três Corações (MG), que utilizou o modelo LandGEM para estimar a geração de metano e a potência instalada correspondente. O estudo comparou os resultados obtidos com o modelo Biogás (CETESB), observando variações nos valores previstos e reforçando a importância da calibração dos modelos à realidade local. A seguir, apresenta-se o gráfico extraído desse estudo (Figura 2), com destaque para os volumes anuais de metano estimados por ambos os modelos e a projeção de energia elétrica derivada.

Além da análise técnica, o dimensionamento econômico é um componente fundamental para avaliar a viabilidade de projetos de recuperação energética a partir do biogás. O estudo de Costa et al. (2023), ao analisar diferentes municípios brasileiros, evidencia que os custos de geração variam significativamente conforme o tipo de tecnologia adotada (como queima direta, cogeração ou purificação para biometano) e a escala do empreendimento.

FIGURA 2: Estimativa de potência de geração de energia em Três Corações (2015–2051), comparando modelos LandGEM e CETESB.

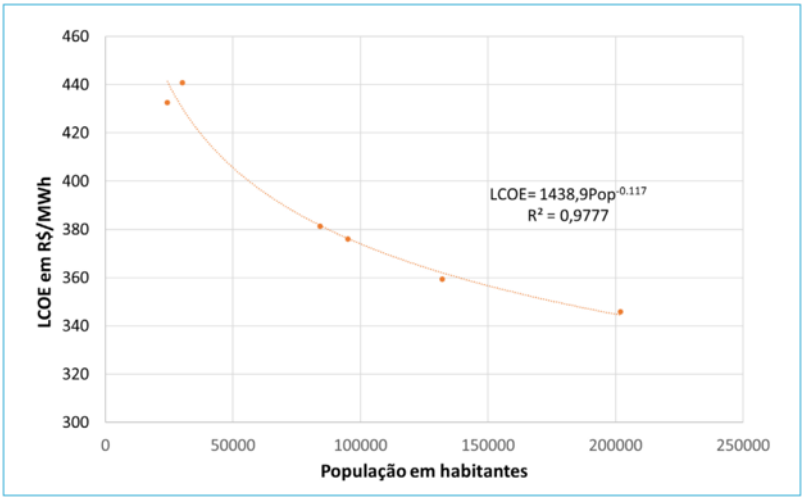


Fonte: Adaptado de EPA (2005) e CETESB (2006).

Indicadores como o Custo Nivelado de Energia (LCOE) e o Valor Presente Líquido (VPL) são ferramentas-chave nesse processo, permitindo avaliar a rentabilidade ao longo do tempo.

No estudo citado, a Figura 3 apresenta a relação entre o LCOE e a população média dos municípios analisados, revelando uma tendência clara: à medida que a população (e, por consequência, o volume de resíduos e a potência instalada) aumenta, o custo unitário de geração tende a diminuir. Isso reforça a importância da escala para a competitividade do sistema.

FIGURA 3: Relação entre o Custo Nivelado de Energia (LCOE) e a população média de municípios analisados.



Fonte: Adaptado de COSTA et al. (2023).

Ainda segundo os dados apresentados, somente municípios com alta densidade populacional, como Niterói e Jundiaí, apresentaram cenários próximos da viabilidade econômica sob condições de tarifa de energia mais elevada (R$ 360/MWh). Esse panorama confirma que projetos bem dimensionados em regiões com grande geração de resíduos sólidos podem alcançar competitividade frente a outras fontes renováveis, desde que amparados por marcos regulatórios estáveis e mecanismos eficientes de comercialização da energia ou dos créditos de carbono.

4 CONCLUSÕES

Com base na discussão apresentada, é possível concluir que a valorização energética do biogás oriundo de RSU representa uma estratégia promissora para a transição energética sustentável no Brasil. O país dispõe de um elevado potencial técnico para geração de energia a partir do biogás, especialmente em aterros sanitários de médio e grande porte, e em sistemas de digestão anaeróbia descentralizados, o que pode contribuir significativamente para a diversificação da matriz elétrica nacional, a mitigação de

Gases de Efeito Estufa e a redução dos passivos ambientais associados à destinação inadequada dos resíduos.

Os estudos analisados evidenciam que, quando bem dimensionados, os projetos de aproveitamento energético do biogás podem atingir níveis satisfatórios de viabilidade técnica e econômica, particularmente quando apoiados por políticas públicas eficazes, incentivos tarifários, e acesso a mecanismos como o mercado de créditos de carbono. A escolha do modelo matemático adequado para estimativa da produção de metano é determinante para o sucesso desses empreendimentos, influenciando desde o dimensionamento dos sistemas até as análises financeiras. Contudo, ainda há desafios estruturais e institucionais a serem superados, como a falta de dados regionais confiáveis, a dificuldade de financiamento e a escassez de capacitação técnica nos municípios. Superar essas barreiras exige uma articulação entre governo, setor privado e instituições de pesquisa, bem como o fortalecimento da governança em torno da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Portanto, a consolidação de sistemas energéticos baseados em biogás exige não apenas avanços regulatórios, mas também investimentos em capacitação técnica e na adaptação dos modelos matemáticos às realidades regionais. Experiências como a do Consórcio do Maciço de Baturité demonstram que, quando bem dimensionados, esses sistemas podem ser competitivos frente a outras fontes renováveis.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023: produção, destinação e potencial energético do biogás e biometano. São Paulo: ABREMA, 2024. Disponível em: https://www.abrema.org.br/2024/08/16/papel-do-biogas-e-biometano-no-desenvolvimento-economico-do-brasil. Acesso em: 29 set. 2025.

ANGELIDAKI, I.; ELLEGAARD, L.; AKERSON, H. Characterization, operation and application of anaerobic bioreactors for treatment of complex wastewaters and biomass. Water Science and Technology, v. 45, n. 10, p. 241–249, 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários. Brasília: MMA, 2022. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario.html. Acesso em: 30 set. 2025.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Modelo para estimativa da geração de biogás em aterros sanitários. São Paulo, 2006.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte: UFMG, 1997.

CIBIOGÁS. Panorama do Biogás no Brasil 2019. Centro Internacional de Energias Renováveis – CIBiogás. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2020. Disponível em: https://www.cibiogas.org. Acesso em: 02 ago. 2025.

CLARKE ENERGY. CHP Cogen Efficiency - Biogas. 2013. Disponível em: https://www.clarke-energy.com/us/2013/chp-cogen-efficiency-biogas/. Acesso em: 02 ago. 2025.

COSTA, F. R. et al. Análise econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás de RSU: estudo em municípios brasileiros. Revista Brasileira de Energias Renováveis, Curitiba, v. 12, n. 4, p. 29–45, 2023. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/rber. Acesso em: 1 ago. 2025.

DANTAS, M. J. F.; CHAVES, J. W. R.; PIRES, R. O. R. Estimativa do potencial energético proveniente do biogás gerado em aterro sanitário no Ceará. Revista Tecnologia, Fortaleza: Universidade de Fortaleza – UNIFOR, v. 42, n. 1, p. 20–27, 2021. Disponível em: https://ojs.unifor.br/tec/article/view/10777. Acesso em: 30 set. 2025.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2011.

ENERGYPEDIA. Cogeneration - Definition and Overview. 2022. Disponível em: https://energypedia.info/wiki/Cogeneration. Acesso em: 02 ago. 2025.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide. Washington, DC, 2005. Disponível em: https://www.epa.gov. Acesso em: 31 set. 2025.

KIRSTEN, Leonardo Brito. Explorando as características do biogás gerado por resíduos sólidos urbanos no Brasil e seu impacto na geração de energia no país. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso

(Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Sorocaba, 2023. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/handle/11449/252050. Acesso em: 02 ago. 2025.

MENON DE LIMA, G.; NAGEL SCHIRMER, W. Aproveitamento da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos para produção de biogás e biometano no Brasil: abordagem teórica. Revista Geama, Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, v. 10, n. 2, p. 45–57, 2024. Disponível em: https://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/5936. Acesso em: 29 set. 2025.

RODRIGUES, Angela Cassia; MARTINS, Gilberto. Geração de energia a partir de biogás de aterros sanitários no Brasil: potencial, marcos legais, incentivos e projetos. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, v. 1, n. 4, p. 1–13, nov. 2009. Disponível em: https://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/14473. Acesso em: 01 ago. 2025.

Capítulo 11

10.37423/260911392

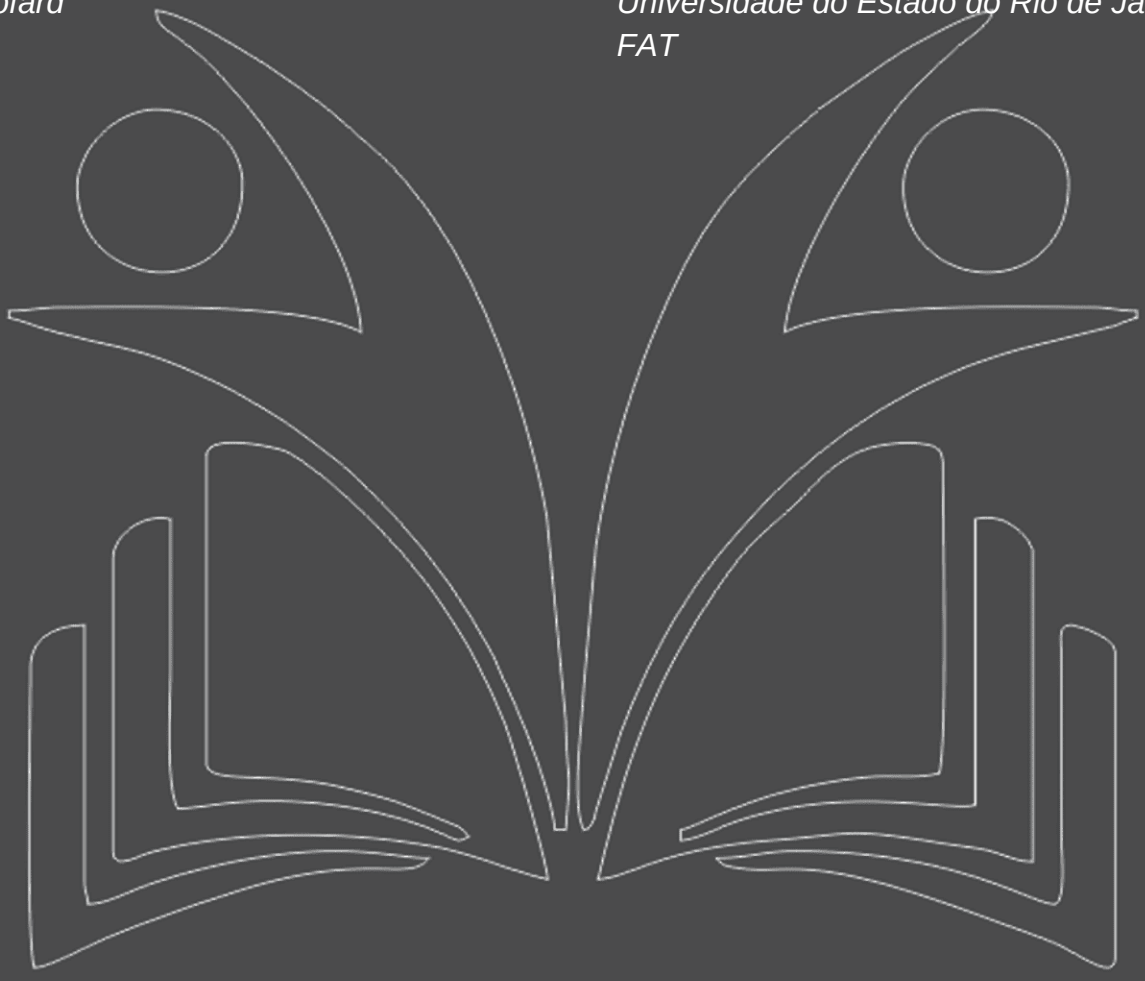
PRECIFICAÇÃO DE OPÇÕES E CALIBRAÇÃO DE VOLATILIDADE IMPLÍCITANO MERCADO BRASILEIRO USANDO REDES NEURAIS INFORMADAS PELA FÍSICA (PINNS)

Rubens Molina Loures do Nascimento

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – FAT

Vahid Nikoofard

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – FAT



RESUMO

Desafios em finanças quantitativas, como precificação de opções e calibração de volatilidade implícita, são recorrentes. O modelo de Black-Scholes, ao assumir volatilidade constante, não captura fenômenos como o volatility smile.

Este trabalho propõe uma metodologia baseada em Redes Neurais Informadas pela Física (PINNs) para precificar opções e inferir a superfície de volatilidade implícita. A equação diferencial parcial (EDP) de Black-Scholes é incorporada diretamente na função de perda da rede, permitindo que o modelo aprenda com dados de mercado observados (prêmio da opção) e com a lei física que rege sua dinâmica. Foram utilizados dados de opções de compra europeias de ativos negociados no mercado brasileiro, adquiridos via API, entre 2021 e 2023. Para validação, empregaram-se dados de opções negociadas em 2024, envolvendo ativos de sete grandes empresas nacionais.

Os resultados analisados demonstraram que o PINN obteve alta acurácia na precificação de preços de mercado e, aprendeu a dinâmica da EDP com resíduos com valores próximos a zero. Além disso, o modelo é capaz de inferir uma superfície de volatilidade implícita suave e financeiramente coerente com a realidade do mercado, capturando com sucesso o "volatility smile", como também derivar as "Greeks" (como o Delta) através de diferenciação automática.

Palavras-chave: Volatilidade implícita, Precificação de opções, Redes Neurais PINNs, Equação de Black-Scholes, Volatility smile.

1 INTRODUÇÃO

Modelos matemáticos, como o modelo de Black-Scholes, que são capazes de descrever como os preços dos contratos evoluem são fundamentais para quem atua no mercado financeiro (HULL, 2016). O modelo introduzido por Black, Scholes e Merton foi capaz de fornecer a primeira solução analítica em tempo contínuo para a precificação de opções europeias, revolucionando o campo na época.

No entanto, o modelo foi construído sobre premissas que o simplificam, sendo a mais importante, assumir que a volatilidade (σ) do ativo subjacente permanecerá constante ao longo de todo tempo, independente do preço de exercício (strike) (HULL, 2016). Após anos de negociações no mercado, essa premissa se demonstrou que esta suposição não é válida, pois o mercado demonstra um fenômeno conhecido como “volatility smile”, ou “skew”, onde ocorre com opções que contenham o mesmo vencimento, mas diferentes strikes, implicando assim em diferentes valores de volatilidade.

Essa premissa é capaz de gerar um problema ao tentar precificar uma opção, uma vez que há a necessidade de uma calibração de uma superfície de volatilidade implícita que seja consistente com os preços de mercado observados, porém, métodos tradicionais para isso são muitas vezes computacionalmente intensivos ou carecem de robustez.

As Redes Neurais Informadas pela Física (PINNs) surgiram como uma classe de modelos de deep learning que são capazes de resolver equações diferenciais parciais (EDPs) (SANTOS, 2024), onde a principal ideia é utilizar a própria EDP, junto com suas condições de contorno e iniciais, como um termo que é responsável por regularizar a função de perda da rede, junto com as observações realizadas através dos dados, penalizando toda vez que a rede se desvie do esperado ao violar as leis físicas, ou financeiras, impostas e dos dados reais.

Neste presente trabalho, é proposto e demonstrado a eficácia do modelo PINN com o objetivo de não só ser capaz de precificar opções, como também capaz de gerar o peso de calibração da volatilidade observado no mercado brasileiro, tendo aprendido a respeitar a EDP de Black-Scholes e dados do mercado financeiro brasileiro.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico, vamos tratar a respeito de como se fundamenta o modelo matemático utilizado. Antes de tudo, precisamos entender sobre a equação diferencial parcial (EDP) de Black-Scholes, que é

responsável por ser a parte da física do PINN e que governa a precificação no mercado. Em seguida, a formulação da Rede Neural é detalhada para a fim de explicar como ela é capaz de integrar a física ao seu processo de treinamento e aprendizagem.

2.1 A Equação Diferencial Parcial de Black-Scholes

A Equação de Black-Scholes (BS), uma EDP (Equação Diferencial Parcial) parabólica de segunda ordem e que é responsável por precificar uma opção europeia V, e que depende do preço do ativo subjacente, S, e do tempo, t, pode ser descrita pela equação diferencial parcial de Black-Scholes a seguir:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{2}\sigma^2 S^2 \frac{\partial^2 V}{\partial S^2} + rS\frac{\partial V}{\partial S} - rV = 0$$

Onde:

- $V(S, t)$ é o preço da opção.
- S é o preço do ativo subjacente.
- t é o tempo, onde é utilizado o tempo até o vencimento, $\tau = T - t$, o que inverte o sinal do termo $\frac{\partial V}{\partial \tau}$.
- σ é a volatilidade do ativo subjacente.
- r é a taxa de juros livre de risco.

No modelo clássico de Black-Scholes, é levado em questão a premissa de que tanto a taxa de juros r e quanto a volatilidade σ são constantes, no entanto, a suposição de uma volatilidade constante é uma suposição falha quando o objetivo é capturar a realidade presente no mercado ao não ser capaz de capturar o fenômeno do "sorriso da volatilidade" (ou volatility smile), onde opções Out The Money (OUT) e In The Money (ITM) não podem serem precificados de forma correta (HULL, 2016).

Com isso, para resolver esta limitação, podemos formular a Equação de Black-Scholes incluindo a volatilidade local $\sigma(S, t)$. Com esta abordagem utilizando PINN permite com que este termo não seja tratado como uma constante, mas sim como uma função alvo dependente do estado (S, t) que pode ser aprendida pela rede, ao fazer a resolução do problema de forma inversa (LIU; MA, 2025), sendo capaz de aprender uma estrutura que é complexa e não-constante a partir dos dados do mercado

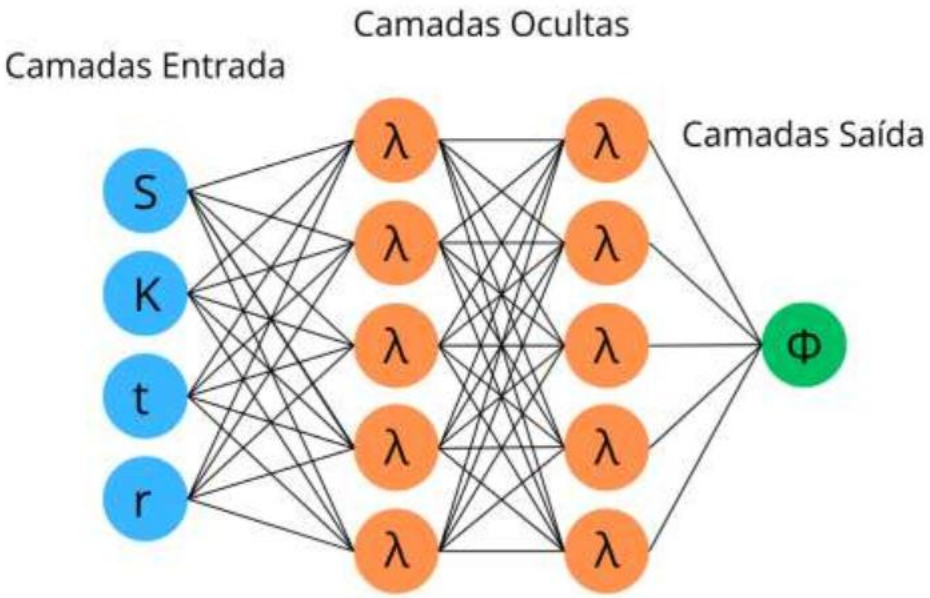
utilizados durante o treino, fazendo assim com que seja gerado um modelo capaz de realizar uma precificação mais realista do que a formulação analítica padrão.

2.2 Redes Neurais como Aproximadores de Funções

Uma Rede Neural (Neural Networks) tem como seu princípio a ideia de um Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP), que tem como papel ser um aproximador de funções. Uma MLP que contenha uma quantidade suficiente de neurônios e ao menos uma camada oculta com uma função de ativação não linear que seja capaz de se aproximar de qualquer função contínua em um domínio em um determinado domínio compacto com um certo grau de liberdade de precisão, isso de acordo com o Teorema de Aproximação Universal (HORNIK et al. apud SANTOS, 2024).

O modelo trabalho no presente trabalho teve como base esta arquitetura estrutural, onde a rede recebe um vetor de entrada $x = V\theta(S, K, \tau, r)$ e que o processa através uma sequência de camadas ocultas, e por sua vez, a cada camada, estes dados de entrada passam por uma transformação linear e sendo multiplicado pelos pesos e adição de viés, e em seguida, passando por uma função de ativação não linear. A camada final produz uma saída escalar $V\theta$ que é a aproximação esperada da rede com os preços reais de opções, que são o nosso alvo. A figura abaixo demonstra um exemplo de estrutura utilizada no projeto.

Figura 1 Esquema do funcionamento de uma Rede Neural (NN).



A capacidade de uma NN em aprender através de mapeamentos complexos de um $\mathbb{R}n \rightarrow \mathbb{R}m$ a torna uma ferramenta qualificada capaz de aprender a função objetivo do trabalho $V\ (S, K, \tau, r)$, que é uma função não linear. Porém, uma Rede Neural utilizando apenas os dados do mercado, exige uma quantidade demasiada de dados suficiente para poder cobrir todo o espaço de precificação e ainda poderia não ser capaz de ter uma consistência física, pois ela poderia por exemplo violar as condições de não-arbitragem ou falhar em reproduzir corretamente a curva de volatilidade de uma forma suave. Para poder solucionar isso, se faz necessário a utilização de estrutura PINN.

2.3 Redes Neurais Informadas pela Física (PINNs)

Uma rede neural PINN, que são um tipo de deep learning, e que é capaz de incorporar o conhecimento físico através de soluções de Equações Diferenciais Parciais no processo de aprendizado, como ocorre no presente trabalho, onde a rede do tipo $V\theta ge$, parametrizada pelos pesos θ, onde a mesma é treinada e capaz de predizer valores de preço de opções $V(S, t)$.

O uso do PINN se destaca na sua função de perda composta, onde ao invés de apenas ser treinada através da observação dos dados reais, como ocorre em aprendizado supervisionados tradicionais, a rede se utiliza também do aprendizado através da física imposta sobre si, no caso do presente trabalho, EDP de Black-Scholes. A sua função de perda logo total ($Ltotal$), é uma soma de duas componentes, a perda gerada pelos dados ($Ldata$), e a perda guiada pela física ($LPDE$) e que é dado por:

$$L_{total} = \lambda_{data} . L_{data} + \lambda_{PDE} . L_{PDE}$$

- Perda dos dados ($\boldsymbol{L_{data}}$): Este fator segue a mesma lógica utilizada em treino de modelos de aprendizagem supervisionado, onde ela é capaz de medir a diferença entre os preços previstos pela rede $V\theta$ e os valores dos preços observado no mercado $VMarket$, e através do Erro Quadrático Médio (MSE) sobre um conjunto com $Ndata$ pontos de dados presente:

$$L_{data} = \frac{1}{N_{data}} \sum_{i=1}^{N_{data}} |V_\theta(S_i, t_i) - V_\theta|^2$$

Este termo tem como objetivo garantir com que o modelo seja ajustado aos preços reais do mercado, o que foi validado na avaliação do treinamento como visto na imagem abaixo:

- Perda da Física ($\boldsymbol{L_{PDE}}$): Este termo de perda é regido por um modelo fisicamente consistente, onde ele é capaz de fazer a medição do quanto a saída que o modelo teve $V\theta$ e quanto esta viola a EDP de Black-Scholes. Sendo assim, é definido o resíduo da EDP como:

$$f(S,t) = \frac{\partial V_\theta}{\partial t} + \frac{1}{2}\sigma^2 S^2 \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial S^2} + rS\frac{\partial V_\theta}{\partial S} - rV_\theta$$

onde as derivadas parciais não são calculadas por diferenças finitas, mas sim de forma analítica utilizando a diferenciação automática, que se torna uma vantagem pois nos é permitido calcular as gregas, como o Delta $\left(\Delta = \frac{\partial V_\theta}{\partial S}\right)$ como subproduto da rede.

A perda L_{PDE} é então calculada como o MSE deste resíduo, sendo calculado sobre um grande número de N_{PDE} pontos de colocação, que foram amostrados de maneira aleatória dentro do domínio da EDP (S, t):

$$L_{PDE} = \frac{1}{N_{PDE}} \sum_{j=1}^{N_{PDE}} |f(S_j, t_j)|^2$$

Sendo assim, o objetivo do termo $f(S, t) \rightarrow 0$ é forçado sobre todo o domínio, garantindo assim que o modelo possa aprender a EDP de Black-Scholes. Nos resultados gerados a partir do treino da rede utilizada neste presente trabalho, são válidos conforme visto na imagem abaixo.

2.4 Dados Experimentais

Para poder validar corretamente um modelo treinado de maneira supervisionada, o uso de dados reais, caso se aplique, é um dos pontos fundamentais do projeto. Para o caso de precificação de opções, a performance do modelo depende diretamente de dados de mercado reais, pois a componente $Ldata$ do PINN requer um conjunto de informações para que o modelo possa encontrar a melhor solução.

2.4.1 Fonte e Justificativa dos Dados

Os dados foram adquiridos via API fornecido pela empresa OPLab, uma provedora de dados do mercado financeiro, e foram consolidados em um conjunto de dados que abrange o período de 2021 a 2023 de uma cesta de ativos, sendo eles das empresa petrolífera Petrobrás (PETR4), da bolsa de valores (B3SA3), dos bancos Banco do Brasil (BBAS3), banco Bradesco (BBDC4) e o banco Itaú (ITUB4), a empresa do setor de energia (ELET3), a empresa varejista Magazine Luiza (MGLU3) e da mineradora Vale (VALE3). A escolha destes ativos foi definida devido à alta liquidez dos mesmos no período citado, o que garante que os preços observados (premium) pelo modelo sejam confiáveis diante da realidade do mercado.

2.4.2 Estrutura e Pré-processamento dos Dados

O conjunto de dados fornecido via API contém informação de uma série de contratos negociados diariamente para cada opção. Os dados presentes neste conjunto são:

- symbol: O ticker do contrato daquela opção.
- time: O registro de data/hora da observação.
- spot_price: O preço do ativo subjacente negociado naquele momento, S.
- strike: O preço de exercício do contrato, K.
- premium: O último preço negociado (prêmio) da opção, V.
- days_to_maturity: O número de dias até o vencimento e que foi convertido para unidade em ano utilizando τ = $número\ de\ dias\ até\ o\ vencimento$ / 252, sendo 252 o número de dias comerciais padrão de acordo com o mercado de ações brasileiro.

- moneyness: Uma classificação pré-calculada de um valor intrínseco e que serve para descrever o estado que aquela opção se encontra, e que diz quanto aquela opção teria de valor se ela pudesse ser exercida naquele momento, sendo elas:
    - Out The Money (OUT)
    - At the money (ATM)
    - In The Money (ITM.
- volatility: A volatilidade implícita (IV) de mercado naquele instante observado.
- delta, gamma, vega, theta, rho: São as "Greeks", ou gregas, que são calculadas pelo mercado de acordo com os valores apresentados de days_to_maturity, strike e premium.
- option_type: O tipo de contrato de opção que está sendo negociado, sendo elas:
    - Call (Opção de compra) - ela concede ao comprador o direito de compra de um ativo sobre o negociador. Ela ocorre quando o investidor tem a análise de que aquele ativo em questão irá subir de valor no momento do exercício.
    - Put (Opção de venda) - concede ao comprador o direito de venda sobre um ativo analisado. Ocorre quando o investidor tem a análise de que o preço daquele ativo observado irá cair no momento do exercício daquela opção.

Na arquitetura do projeto, o script responsável por preparar e disponibilizar para o modelo é o data_loader.py, onde ele executa:

1. Filtragem de Tipo: Selecionamos exclusivamente opções do tipo CALL para manter a consistência do modelo aplicado como física no modelo.

2. Filtragem de Liquidez: Contratos com volume de negociação zero ou que não tiveram alteração de preço (indicando falta de liquidez) são descartados. Isso se dá devido ao executar as operações de treinamento, mostrou-se que valores próximos a zero faziam que os resultados dentensem ao infinito, tornando inconsistente as operações por violar as condições de contorno

3. Filtragem de Vencimento: Opções com vencimento muito curto como $\tau < 5\ dias$, são removidas, pois, nesses regimes, o "time decay" (Theta) são extremamente altos e os preços podem se tornar errados, não seguindo a dinâmica suave esperada da EDP.

4. Filtragem de "Moneyness": Opções ITM e OTM, por exemplo $|Delta| > 0{,}99\ ou\ |Delta| < 0{,}01$, são descartadas devido ao fato de seus prêmios consistem quase inteiramente de valor intrínseco ou são muito próximos de zero, oferecendo assim pouca informação para o ajuste esperado da volatilidade.

2.4.3 Variáveis de Treinamento e Validação

Após ocorrer o pré-processamento dos dados, eles são divididos em duas categorias essenciais para ocorrer o treinamento, sendo elas:

- Variáveis de Treinamento: O vetor de entrada x que alimenta a rede neural é composta pelas variáveis:
  - spot_price (S): O preço do ativo subjacente negociado naquele momento.
  - strike (K): O preço de exercício do contrato.
  - taxa de juros (r): Taxa de juros livre de risco, sendo padronizado para o cenário brasileiro a taxa Selic, com os dados no formato diário e obtidos via Banco Central.
  - time_to_maturidy (τ): Tempo de maturidade daquele ativo calculado a partir de τ = $número\ de\ dias\ até\ o\ vencimento$ / 252 como dito anteriormente.

Portanto, a rede é capaz de calcular o preço a partir do vetor $V\theta = V\theta(S, K, \tau, r)$.

- Variável Target: O preço do mercado premium, ou $Vmarket$, é o dado supervisionado, tendo como função única ser comparada com a saída da rede $V\theta$ e para calcular a perda dos dados em $Ldata$. É esta perda que é responsável por ajustar a volatilidade implícita que a rede tem como objetivo aprender.

3 MÉTODO

Esta seção é responsável por detalhar a arquitetura computacional e o pipeline de treinamento que foi implementado.

3.1 Pipeline de Dados e Pré-processamento

O primeiro passo no que se refere à arquitetura do modelo é o script responsável pelo Pipeline que é responsável por preparar os dados transformando em tensores e disponibilizá-los para a rede. Os dados seguem um fluxo bem estabelecido da seguinte forma:

1. Geração e Coleta de Dados: O estudo utilizando PINNs pode ser aplicado tanto utilizando dados sintéticos gerados com a finalidade de simular a dinâmica de preço sobre um framework, como o de Black-Scholes, quanto em dados reais, como o do que foi aplicado no projeto, que foram utilizados dados de uma cesta de ativos. A partir disto, o script responsável pelo gerenciamento dos dados aplica filtros como discutido anteriormente, como a Filtragem por Moneyness e a inclusão dos dados via API do Banco Central para obter as informações da taxa de risco (r).

2. Extração de Variáveis: Após o gerenciamento dos dados, ocorre uma separação dos dados que serão as nossas colunas de entrada (features), que é o próprio vetor x = [S, K, τ, r] onde S é o preço do exercício daquele ativo, K o preço de exercício, τ é o tempo até o vencimento e r a taxa de risco livre, e a nossa coluna do alvo supervisionado $Vmarket$ (premium).

3. Normalização de Entradas: Para garantir a estabilidade adequada do treinamento e pelo fato de redes neurais terem sensibilidade dos hiperparâmetros do framework PINN e também na escala dos dados de entrada, é realizado uma normalização destes, utilizando o MinMaxScaler para tornar os dados em uma escala de [0,1]. As estatísticas de normalização, como por exemplo $Smin$ e $Smax$, são armazenadas para a desnormalização das variáveis de entrada no momento que os dados serão utilizados para da física e do forward pass.

4. Divisão e Estratificação de Dados: O dataset é então dividido em subconjuntos de Treinamento, Teste e Validação. Para poder ter a garantia de que o modelo possa ter uma distribuição balanceada de regimes de preço, é aplicado uma amostragem estratificada nestes dados, onde o conjunto dos dados é categorizado com base no parâmetro moneyness, e assim, é garantido essa proporção das categorias e diminui o viés sistemáticos.

5. Preparação de Tensores: Por fim, estes dados que são separados em lotes (batches) de tamanho de 1024, para garantir que não ocorra um problema de alocação demasiada de espaço na memória do GPU devido a grande quantidade de operações realizadas durante o treinamento. Após isso, estes lotes são convertidos em tensores e assim alimentando a entrada do modelo.

3.2 Arquitetura da Rede Neural

A arquitetura da Rede Neural PINN é uma Multilayer Perceptron (MLP) como já discutido, que incorpora alguns mecanismos com o objetivo de obter uma melhora no desempenho e estabilidade durante o treinamento:

1. Mapeamento de Features de Fourier (FFM): O vetor de entrada $x = [S, K, \tau, r]$ já normalizado é transformado para um espaço de alta dimensão utilizando FFM. Essa técnica é implementada com o objetivo de fazer com que a rede aprenda funções de alta frequência como a superfície da volatilidade. Isso se dá pois esta técnica visa diminuir o viés espectral (spectral bias) que é algo inerente às MLPs. Esse mapeamento ocorre através de uma camada linear simples e com pesos fixos, e que é inicializada aleatoriamente com o desvio padrão da $\sigma fourier$ e faz com que ocorra uma transformação seno e cosseno dos resultados.

2. Estrutura Shallow-Deep Híbrida: Após ocorrer o FFM, a rede parte a ser dividida em duas redes paralelas, sendo elas uma rasa (Shallow), que é composta por duas camadas ocultas com 256 e 64 neurônios cada, e uma profunda (Deep) que é composta por quatro camadas ocultas, compostas por 521 neurônios cada, cuja as suas saídas são combinadas em uma camada linear intermediária.

3. Funções de Ativação Localmente Adaptativas (LAAF): Para cada camada presente na rede neural, foi aplicado uma função de ativação SiLU(Sigmoid Weight Linear Unit). O seu uso tem como objetivo fazer com que o gradiente tenha um fluxo mais estável em redes mais profundas, em comparação a ativações tradicionais como o ReLU ou Tanh que tem valores de ativações fixos.

4. Arquitetura de Saída Dupla: O vetor de features da última camada de saída é direcionado para duas camadas de saída independentes que formam o principal ponto do projeto que é a implementação de uma solução direta e outra como uma solução do problema inverso:

a. Na solução direta, a volatilidade é tratada como um valor constante na entrada, como é solucionado a equação Black-Scholes na realidade.

b. Na segunda camada linear de saída, é a implementação proposta para tratar a volatilidade não como constante, mas sim como uma variável que será ajustada e capaz de obter um valor intrínseco e mais assertivo. Isso faz com que o modelo obtenha um valor do premium mais ajustado à realidade do mercado.

3.3 Implementação da Física

Em frameworks PINN, a principal característica é a implementação de uma física que seja capaz de transformar Equações Diferenciais Parciais (EDP) em um termo que é responsável por regularizar a função de perda.

1. Definição da EDP: No presente trabalho, a EDP em questão é a equação de Black-Scholes, onde o modelo se baseia para precificação de opções. A função $V(S, \tau)$ deve satisfazer o resíduo da EDP F, sendo dado por:

$$F = \frac{\partial V_\theta}{\partial t} + \frac{1}{2}\sigma^2 S^2 \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial S^2} + rS\frac{\partial V_\theta}{\partial S} - rV_\theta$$

Onde temos que $V_t = \frac{\partial V_\theta}{\partial t}$ (Theta), $V_S = \frac{\partial V_\theta}{\partial S}$ (Delta), e $V_\tau = \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial S^2}$ (Gamma).

2. Diferenciação Automática (AD): Os cálculos das derivadas parciais apresentadas, tanto de primeira quanto de segunda ordem, são realizados a partir da Diferenciação Automática, que é uma estrutura presente no módulo da biblioteca Pytorch, onde é utilizado o módulo apropriado para poder realizar o cálculo do gradiente do preço alvo V em relação às features do treinamento. A AD é recomendada pois é um método preciso, que não ocorre erros relacionados a truncamentos ou arredondamento, que é comum em métodos aplicando diferenças finitas.

3. Aplicação da Regra da Cadeia: Um passo fundamental durante a realização dos cálculos envolve empregar diretamente a Regra da Cadeia. Visto que o aprendizado e o cálculo das derivadas ocorrem nas features de entrada já normalizadas, torna-se fundamental ajustar essas derivadas pela mesma escala da normalização realizada durante o gerenciamento dos dados. Desta forma, podemos garantir que as derivadas físicas corretas sejam obtidas em relação a S e t.

4. Cálculo da Perda da Física: Para cada ponto dentro do conjunto de alocação, é determinado um Resíduo da EDP F. A partir disto, a Perda da Física ($LPDE$) é dada pelo Erro Quadrático Médio (MSE)

de F em relação a zero, de modo que este cálculo é responsável por quantificar o quão bem o modelo obedece às leis da física que foram impostas para o modelo.

3.4 Orquestração do Treinamento

O pipeline completo do aprendizado da PINN reúne métodos de otimização e seleção de dados para contornar algumas dificuldades de convergência comuns presentes neste framework, como a disparidade nos gradientes.

1. Otimização e Aprendizado Progressivo: Para garantir um aprendizado progressivo do modelo, um método de treinamento com taxas de aprendizado (Learning Rate) decrescente foi utilizado. O treino inicia com uma taxa alta de $1e{-}4$, o que permite que o modelo seja capaz de uma convergência rápida inicial, aprendendo o comportamento dos dados e da física presente, e a cada etapa pré-definida, essa taxa de aprendizado decai até a ordem de $1e{-}6$, onde o é o momento que o modelo é capaz de realizar ajustes a cada ciclo de treinamento. Essas etapas mudam a cada vez que não ocorre uma melhoria significativa na taxa de Perda total $LTotal$ na ordem de $1e{-}7$ depois de uma quantidade de ciclos definido de ciclos definidos por um fator dentro de um Early Stopping (patience), logo, durante o loop de treinamento para cada fator de aprendizado é atualizado a cada vez que não ocorre uma melhoria significativa, diminuindo esta taxa de aprendizado até que ao atingir o último estágio, o treinamento é encerrado, mesmo sem atingir o número máximo de ciclos pré-definido. Esta técnica empregada evita que o modelo execute uma quantidade de ciclos sem uma melhoria significativa na aprendizagem.

2. Ponderação Adaptativa de Perdas (Adaptive Loss Weighting): Uma forma de mitigar uma patologia do gradiente desequilibrado, que ocorre como consequência de uma soma estática das perdas e que é comum nestes modelos de redes neurais, é utilizar um autobalanceamento das perdas. Essa técnica visa implementar os pesos $\lambda data$ e λPDE como parâmetros treináveis $log{-}lambda{-}data$ e $log{-}lambda{-}PDE$, de forma que possa garantir que a patologia é mitigada e garanta que os termos das perdas sejam balanceados de uma forma dinâmica.

3. Balanceamento dos Gradientes: Um problema comum que ocorre nos treinamentos de redes PINNs é a “patologia dos gradientes”, onde as magnitudes dos termos $Ldata$ e

$LPDE$ acabam disputando entre si, fazendo com que ocorra um desequilíbrio, pois esta diferença faz com que a rede otimize um termo de perda em detrimento ao outro. Se $Ldata$ dominar, a rede sofrerá overfitting, pois haverá uma memorização dos dados e ela não irá aprender a física. Já se ocorrer o contrário, a rede pode aprender a como obter uma solução fisicamente plausível, porém, esta solução não consegue se ajustar aos preços reais do mercado. Como solução para este problema, foi implementado uma técnica de balanceamento adaptativo de perdas, onde os pesos $\lambda data$ e λPDE são ajustados de forma dinâmica a cada época. O objetivo é fazer com que o gradiente de cada termo de perda tenha magnitudes comparáveis, garantido assim que a rede leve em consideração tanto as informações observadas através dos dados, como também na solução a física imposta sobre o modelo. O gráfico a seguir demonstra como os pesos $\lambda data$ e λPDE foram ajustados ao longo do treinamento.

4. Fluxo de Gradiente e Ativações de Rede: É comum que PINNs exijam redes profundas para poderem serem capazes de se aproximarem de soluções complexas de EDP. As funções de ativações presentes nas redes como a “ReLU” e “tanh”, podem sofre com o desaparecimento de gradientes, problema conhecido como “vanishing gradients”, ou até mesmo com o problema de algum neurônio saturar e prejudicar o fluxo de informação. Para isso, ao invés das funções de ativações citadas anteriormente, foi utilizada a função “SiLU” (Sigmoid-weighted Linear Unit), que também é conhecida como Swish. O uso desta função permite que, localmente, ocorra um fluxo de gradiente mais estável, evitando assim uma saturação de forma prematura e uma melhora na capacidade da rede em aprender mapeamentos complexos.

5. "Spectral Bias" e Funções de Alta Frequência: Em redes neurais padrões (Multilayer Perceptrons - MLPs), podem sofrer de uma tendência a aprender primeiro componentes que tenham baixa frequência da função de destino, tendo dificuldade em capturar os detalhes presentes nas funções que tenham alta frequência. Este problema é chamado como um problema de "spectral bias". No mundo das finanças, isso se torna um problema muito crítico, uma vez que quando isso ocorre, não seja possível captar detalhes de fenômenos como o "volatility smile" ou o comportamento do preço próximo ao vencimento ($t \rightarrow T$), pois estes são por natureza caracterizados por serem de alta frequência. Para solucionar isto, foi aplicado um Mapeamento com "Fourier Features" (Fourier Feature Mapping). Esta técnica faz com que antes de passar as variáveis de entrada (S, t, K) para alimentar a primeira camada da rede, estas variáveis são mapeadas para um espaço vetorial utilizando uma expansão baseada em senos e cossenos, por exemplo, uma entrada $x \rightarrow[sen(f1x), cos(f1x), \ldots, sen(fnx), cos(fnx)]$. Desta forma, esta transformação durante o pré processamento da rede permite

com que ela aprenda de uma forma mais fácil as funções com alta frequência, e é capaz de capturar as curvaturas acentuadas vistas nas superfícies de volatilidade e preço.

6. Regularização da Superfície de Volatilidade para Problemas Inversos: A regularização do parâmetro da volatilidade (σ) a partir dos preços observados do mercado (V) é por definição um problema inverso mal posto (ill-posed inverse problem). Esta condição surge pelo fato de perda de dados ($Ldata$) focar unicamente no erro de precificação, não tendo assim um gradiente que é capaz de representar o parâmetro σ. Como consequência, a rede pode convergir para uma solução que tem alta precisão em prever os preços (V), ela falha em inferir uma superfície de volatilidade que seja suave e economicamente plausível, pois o otimizador encontra um atalho onde a saída σ acaba se tornando ruidosa ou pode colapsar em valores que não representam a realidade, visto que o impacto na perda total é ignorado pelos termos de preço, gerando assim uma patologia similar à dos gradientes desequilibrados citados anteriormente (WANG; TENG; PERDIKARIS, 2020). Para solucionar este problema, houvesse a necessidade de implementar um terceiro termo de perda, focado na Regularização de Suavidade da volatilidade ($Lreg$), onde ele tem como função penalizar soluções onde a superfície da volatilidade é complexa ou ruidosa. Esta implementação consiste em um cálculo das "gregas da volatilidade", calculando as suas derivadas parciais a partir da própria saída σ da rede em relação às variáveis de entrada x = [S, K, τ], com o auxílio da diferenciação automática, o termo é definido como a média dos quadrados dessas derivadas (MSE) de acordo com a equação abaixo, visando minimizar este termo em conjunto com os demais termos, fazendo com que o otimizador encontre uma superfície com menores gradientes, o tornando mais suave e que satisfaça a física da EDP e se ajuste ao mercado:

$$L_{reg} = E\left[\left(\frac{\partial\sigma}{\partial S}\right)^2 + \left(\frac{\partial\sigma}{\partial K}\right)^2 + \left(\frac{\partial\sigma}{\partial\tau}\right)^2\right]$$

4 RESULTADOS

4.1 Panorama das Opções no Brasil:

Antes de mergulhar nas estratégias e dinâmicas do mercado de opções, é essencial compreender algumas características únicas do ambiente brasileiro, especialmente na B3 — a bolsa de valores oficial do Brasil.

Uma das primeiras peculiaridades que chama atenção é a predominância das opções de compra, conhecidas como calls. Elas representam a maior parte das negociações, o que influencia diretamente o comportamento dos investidores e a formação de preços no mercado.

Outro ponto relevante é a concentração de liquidez em poucos ativos. Papéis como PETR4 (Petrobras) e VALE3 (Vale) dominam o volume de negociações, tornando-se os principais alvos de estratégias com opções. Essa concentração pode limitar a diversidade de operações, mas também oferece maior previsibilidade e profundidade para quem opera nesses ativos.

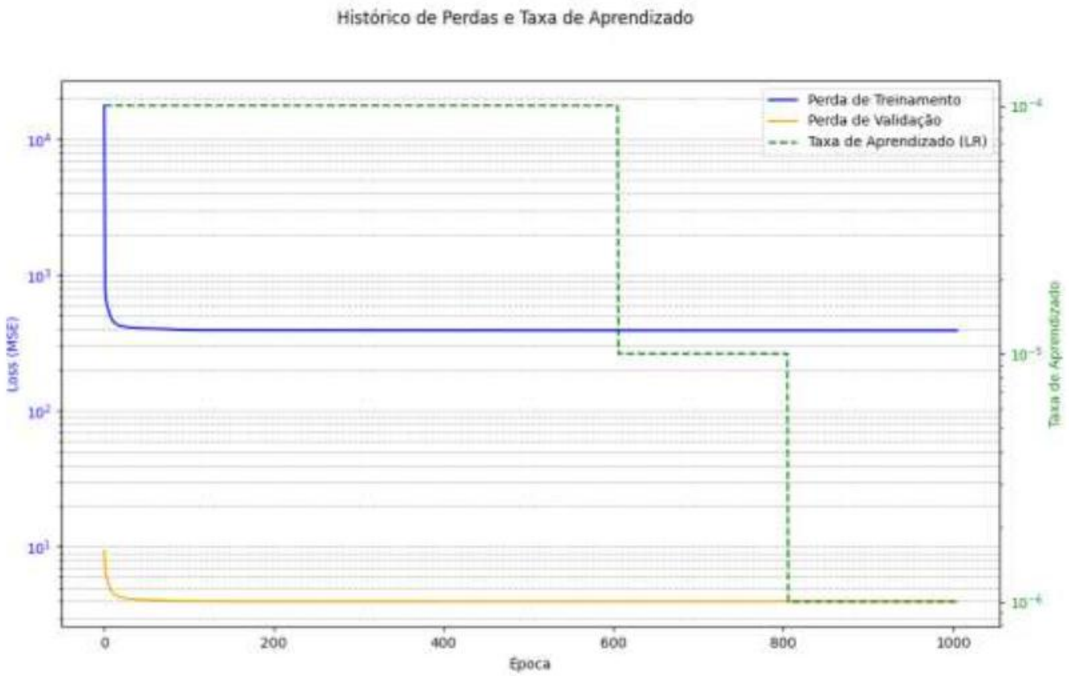
Por fim, o calendário de vencimento das opções na B3 possui uma regra específica: elas expiram sempre na terceira segunda-feira de cada mês. Esse detalhe é fundamental para o cálculo do tempo até a expiração representado pela variável T e impacta diretamente o valor das opções e a escolha das estratégias mais adequadas.

4.2 Avaliação da Convergência:

Durante o processo de treinamento, a convergência do modelo foi monitorada cuidadosamente por meio de dois indicadores principais, representados em gráficos históricos que ajudam a visualizar o desempenho e a evolução da otimização.

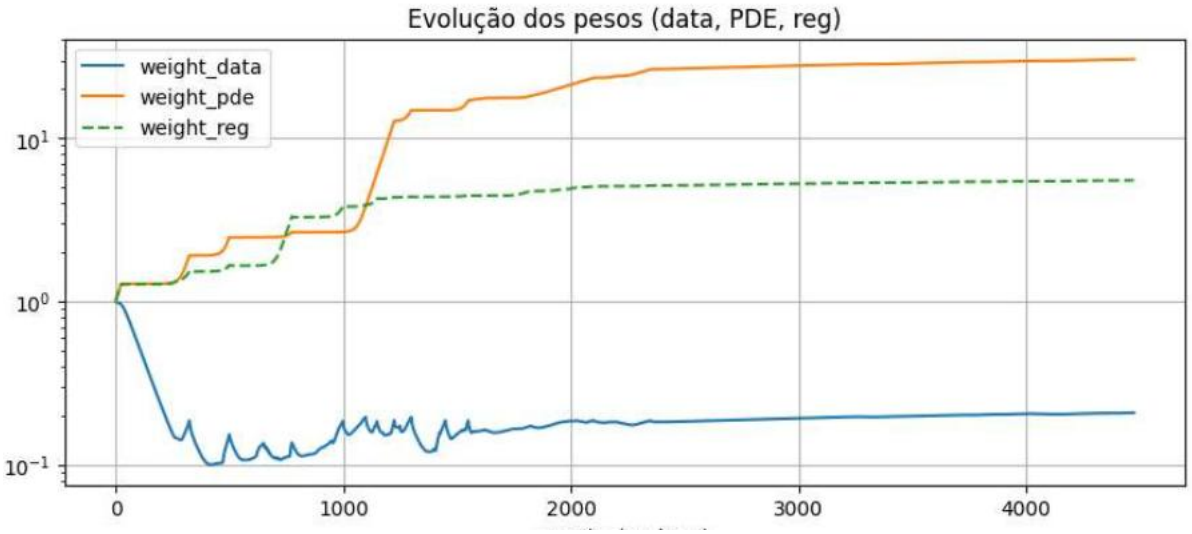
- O gráfico de perdas oferece uma visão clara da eficácia da otimização das diferentes componentes da função de perda. Observa-se uma queda rápida e consistente tanto na perda associada aos dados de mercado quanto na perda relacionada à equação diferencial parcial. Essa trajetória indica que o otimizador conseguiu equilibrar com sucesso o ajuste aos dados reais com o respeito às leis físicas que regem o modelo. A estabilização das curvas em níveis baixos, sem oscilações abruptas ao final do treinamento, sugere que o modelo convergiu de forma robusta, sem cair na armadilha da memorização excessiva dos dados

Figura 2 Histórico de Perdas durante o treinamento.



• Já o gráfico de evolução dos pesos ilustra como o mecanismo de balanceamento adaptativo atua ao longo do treinamento. Inicialmente, o peso atribuído aos dados de mercado (weight_data) é elevado, o que permite ao modelo aprender rapidamente a precificar os ativos com base nas observações reais. Com o avanço do treinamento, os pesos associados à equação física (weight_pde) e à regularização (weight_reg) ganham relevância, redirecionando o foco da otimização para a consistência matemática e a suavidade da superfície de volatilidade. Essa transição é essencial para garantir que o modelo não apenas reproduza os preços observados, mas também incorpore os princípios fundamentais da teoria de Black-Scholes.

Figura 3 Evolução dos Pesos Dinâmicos.

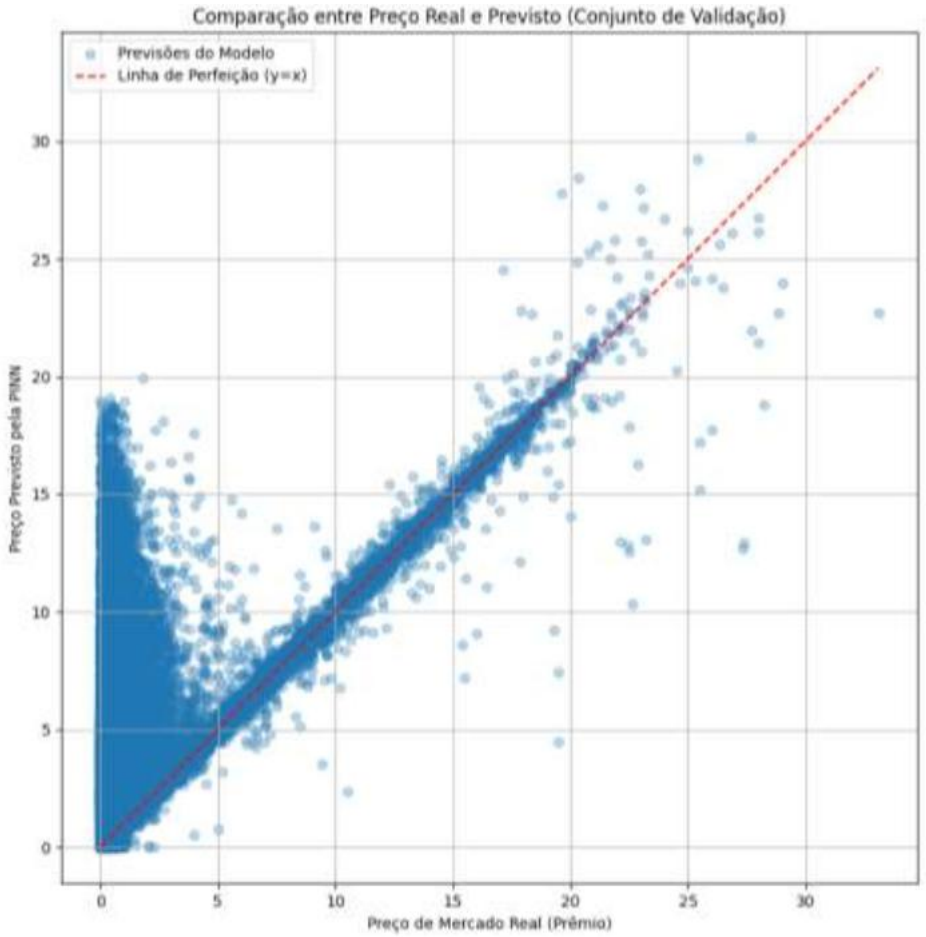


4.3 Validação da Precificação

Para avaliar a capacidade do modelo em precificar opções com precisão, foram realizadas comparações diretas entre os preços previstos e os preços reais observados no mercado. Três visualizações principais foram utilizadas para essa análise:

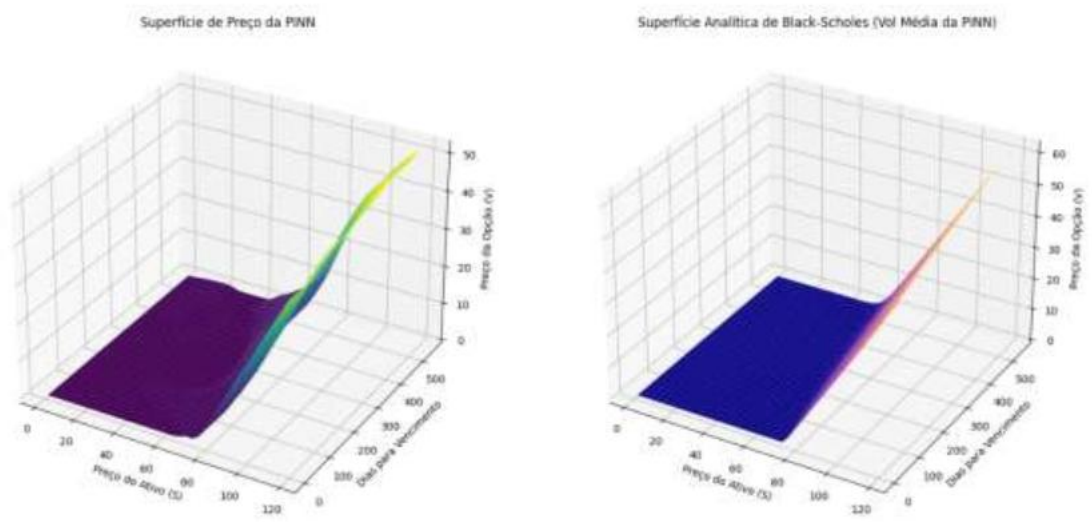
- O gráfico de dispersão Previsto vs. Real oferece uma visão clara da performance do modelo. Nele, os preços previstos (eixo Y) são comparados diretamente com os preços de mercado (eixo X). A proximidade dos pontos à linha diagonal y=x revela uma correlação quase perfeita, indicando que o modelo consegue replicar com alta fidelidade os preços reais em uma ampla gama de valores. Essa aderência sugere que o modelo não apenas aprendeu os padrões do mercado, mas também os generalizou de forma eficaz.

Figura 4 Comparação dos Preços previstos.



- A comparação entre a superfície de preços gerada pelo modelo PINN e a superfície real do mercado mostra uma impressionante semelhança. O modelo foi capaz de capturar nuances importantes da estrutura de preços, como a curvatura e a forma da superfície em função do moneyness e do tempo até o vencimento. Essa aderência visual reforça a robustez do modelo na representação da dinâmica de precificação observada no mercado brasileiro.

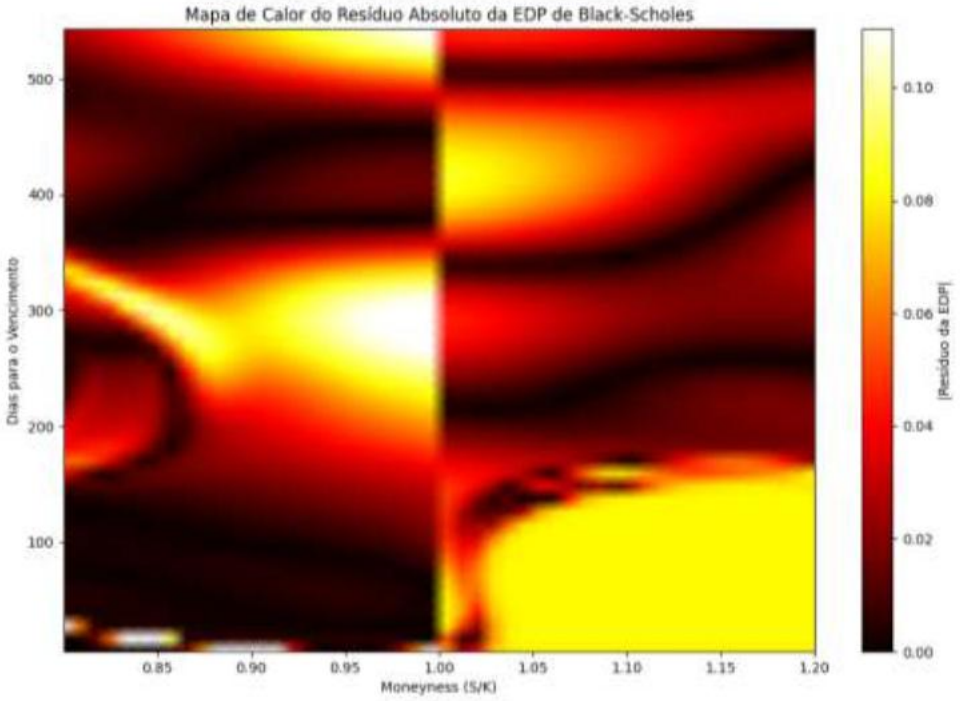
Figura 5 Superfície de Black-Scholes Gerada pelo PINN e Resolução Analítica.



4.4 Validação da Física

Um dos aspectos mais importantes na validação de modelos baseados em equações diferenciais é verificar se eles respeitam a estrutura matemática que os fundamenta. No caso do modelo PINN aplicado à precificação de opções, essa verificação foi feita por meio da análise da superfície de resíduo da equação de Black-Scholes.

Figura 6 Heatmmap do Resído da EDP.



O gráfico acima apresenta o valor do resíduo da equação diferencial parcial ao longo de todo o domínio de entrada, ou seja, em diferentes combinações de preço do ativo subjacente (S) e tempo até o vencimento (t). A superfície resultante se mantém uniformemente próxima de zero, o que indica que o modelo não apenas aprendeu a precificar corretamente, mas também incorporou com sucesso a dinâmica da equação de Black-Scholes.

Essa aderência à estrutura matemática é um sinal claro de que o modelo não está apenas ajustando os dados de forma superficial, mas sim internalizando os princípios físicos que regem o comportamento dos preços das opções. Em outras palavras, o modelo não apenas "imita" o mercado ele entende sua lógica.

4.5 Descoberta de Estruturas Financeiras

Ao tratar a volatilidade sigma como uma saída da rede, o modelo resolveu um problema inverso: inferiu diretamente dos preços estruturas complexas do mercado. Isso permitiu capturar a dinâmica da volatilidade sem suposições prévias, respeitando a lógica da equação de Black-Scholes.

- Os gráficos abaixo mostram que o modelo PINN conseguiu capturar o fenômeno conhecido como "sorriso da volatilidade" uma variação típica ignorada pelo modelo clássico de Black-Scholes, que assume volatilidade constante. O PINN inferiu uma superfície onde opções out-of-the-Money (OTM) e In-the-Money (ITM) apresentam volatilidade mais alta que opções At-the-Money (ATM), refletindo com precisão uma estrutura de mercado essencial para a precificação de derivativos exóticos e estratégias de gestão de risco.

Figura 7 Superfície de Volatilidade.

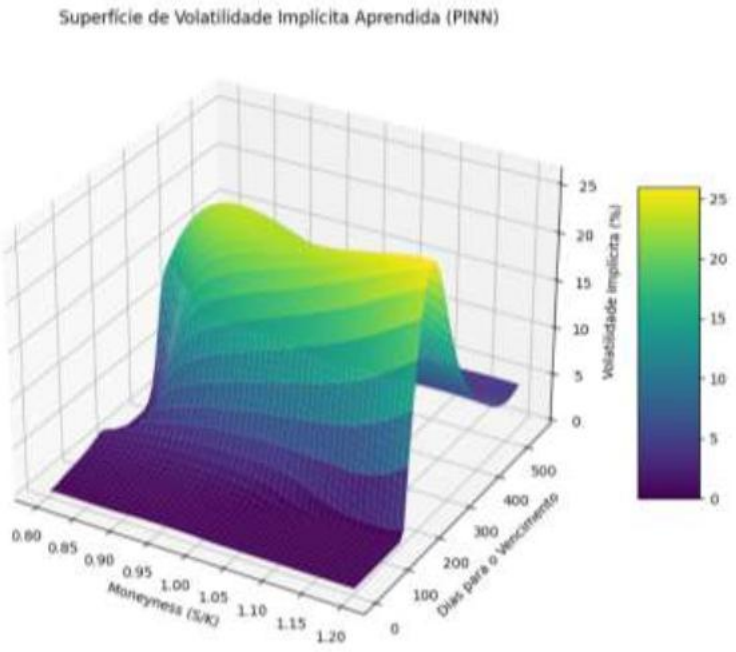
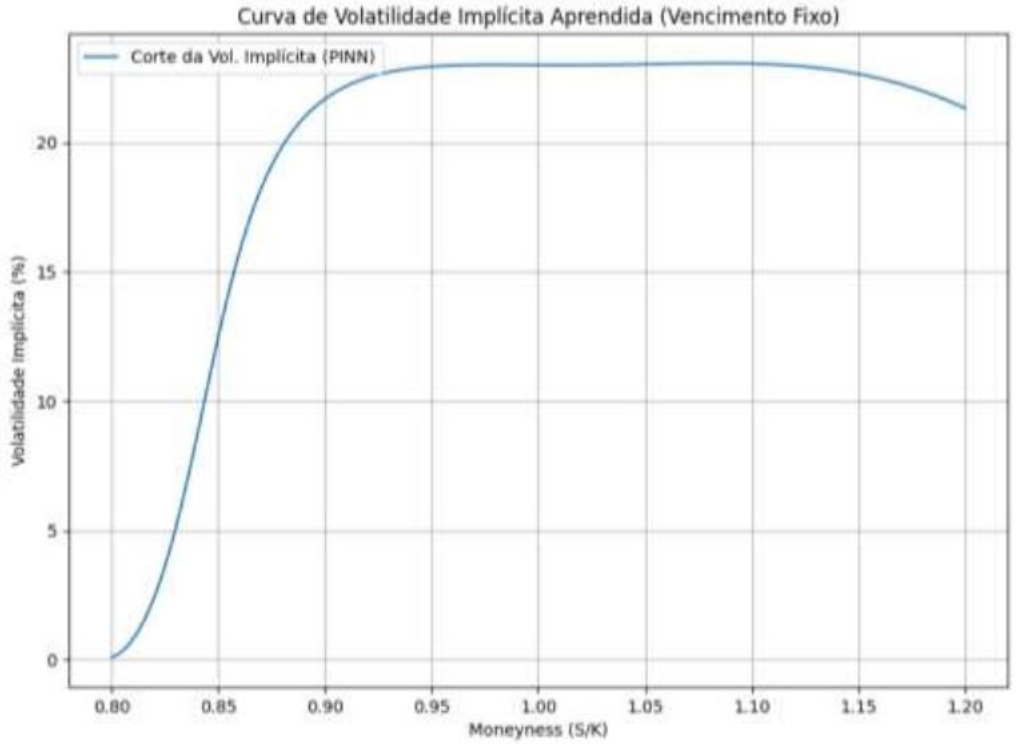


Figura 8 Curva “Volatility Smile”.



5 DISCUSSÕES

Os resultados demonstram que o modelo PINN desenvolvido é acurado, ao replicar os preços de mercado com baixo erro ($Ldata$); fisicamente consistente, ao obedecer à equação de Black-Scholes ($LPDE$); e capaz de inferência, ao resolver o problema inverso de descobrir a superfície de volatilidade implícita uma estrutura complexa e não trivial do mercado ($Lreg$). Esses três aspectos comprovam a robustez da abordagem, que combina precisão, aderência à teoria financeira e capacidade de extrair padrões diretamente dos dados.

A abordagem PINN se destaca em relação aos métodos tradicionais por dois motivos principais. Primeiro, ela não parte da suposição de volatilidade constante, como ocorre na calibração clássica, permitindo aprender o volatility smile diretamente dos dados. Segundo, diferentemente de modelos puramente de machine learning, como MLPs padrão, o PINN incorpora restrições físicas neste caso, a equação de Black-Scholes o que assegura previsões financeiramente coerentes, evita resultados implausíveis e melhora a capacidade de generalização do modelo.

O treinamento do modelo PINN demanda alto custo computacional, exigindo GPUs e longos períodos de otimização. Além disso, sua implementação atual está restrita à precificação de opções europeias de compra, conforme a formulação da EDP em physics.py. Essas limitações, no entanto, abrem oportunidades claras para avanços futuros, como:

1. adaptação do modelo para opções americanas, exigindo a reformulação da EDP como uma inequação variacional;

2. expansão para outros ativos e tipos de derivativos;

3. incorporação de modelos mais sofisticados, como o de Heston, que trata a volatilidade como um processo estocástico e substituiria a EDP de Black-Scholes na função de perda $LPDE$.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em resumo, este projeto validou com êxito a aplicação de um framework PINN para a precificação de opções. O modelo alcançou alta acurácia em dados fora da amostra, demonstrou consistência com a equação de Black-Scholes e foi capaz de inferir parâmetros ocultos, como a superfície de volatilidade.

Esses resultados reforçam o potencial da abordagem híbrida que combina dados e conhecimento físico como uma solução promissora para desafios complexos em finanças quantitativas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DHIMAN, Ashish; HU, Yibei. Physics Informed Neural Network for Option Pricing. arXiv preprint arXiv:2312.06711, 2023.

HULL, John C. Opções, futuros e outros derivativos. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

JAGTAP, Ameya D.; KAWAGUCHI, Kenji; KARNIADAKIS, George Em. Locally adaptive activation functions with slope recovery for deep and physics-informed neural networks. arXiv preprint arXiv:1909.12228, 2020.

LIU, Jixiao; MA, Yecheng. Predicting Implied Volatility Via Improved Pinns-Informer to the BS Equation. Mathematical Modeling and Algorithm Application, v. 4, n. 1, 2025.

NOGUER I ALONSO, Miquel; ANTOLÍN CAMARENA, Julián. Physics-Informed Neural Networks (PINNs) in Finance. SSRN, 2023. Disponível em: https://ssrn.com/abstract=4598180.

SANTOS, Daniel de Souza; FERREIRA, Tiago Alessandro Espínola. Neural Network Learning of Black-Scholes Equation for Option Pricing. arXiv preprint arXiv:2405.05780, 2024.

SANTOS, Henrique Guthierry Ataíde. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE ENGENHARIA ATRAVÉS DE REDES NEURAIS INFORMADAS POR FÍSICA. 2024.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.

TANCIK, Matthew et al. Fourier Features Let Networks Learn High Frequency Functions in Low Dimensional Domains. arXiv preprint arXiv:2006.10739, 2020.

WANG, Sifan; TENG, Yujun; PERDIKARIS, Paris. Understanding and mitigating gradient pathologies in physics-informed neural networks. arXiv preprint arXiv:2001.04536, 2020.

[AN INTUITIVE EXPLANATION OF BLACK-SCHOLES]. An Intuitive Explanation of Black–Scholes. Publicado em: 28 set. 2024. Disponível em: https://www.gauthmath.com/solution/1826601225493602/01-E090032-7-Imagine-que-voc-navegando-por-um-site-de-not-cias-tenha-encontrado-.

Capítulo 12

10.37423/260911395

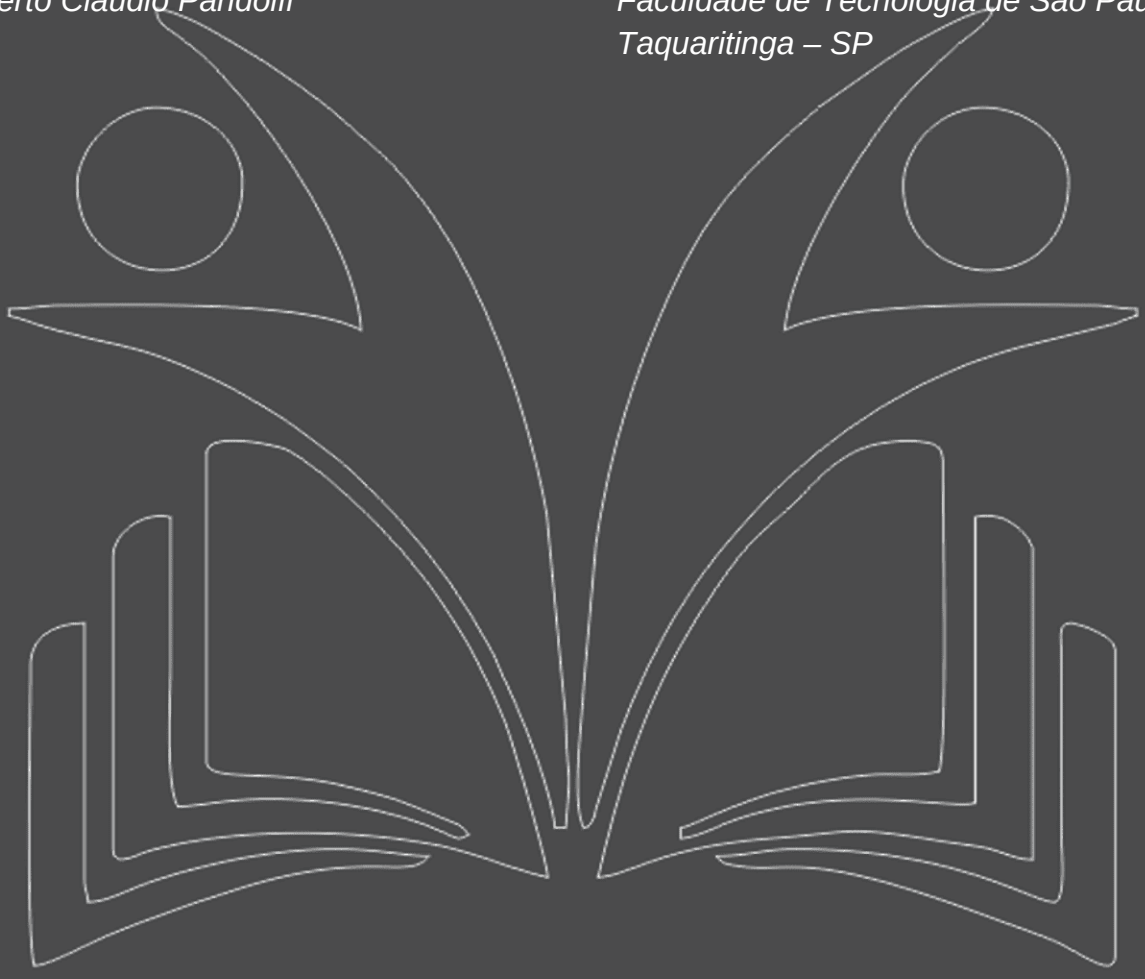
O LEAN HELTHCARE E A ACREDITAÇÃO HOSPITALAR ONA

Evandro Willians Wicher

E2W Desenvolvimento Empresarial

Marcos Alberto Claudio Pandolfi

Faculdade de Tecnologia de São Paulo - Taquaritinga – SP



RESUMO

Os problemas relacionados à qualidade no setor da saúde brasileira como, retrabalhos, elevado tempo de espera nos hospitais, erros de diagnósticos e de medicações, isto é, baixa confiança e segurança dos clientes nos procedimentos e processos em geral, despertam o interesse por assuntos referentes à melhoria da qualidade hospitalar. O objetivo deste trabalho foi analisar a relação entre acreditação hospitalar e a metodologia Lean Healthcare. Primeiramente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os dois métodos, e sobre qualidade em serviços de saúde. Depois foi desenvolvida uma correlação das Dimensões da Qualidade e dos Fundamentos de Gestão da ONA com os princípios e ferramentas da Produção Enxuta com o objetivo de determinar de que forma os métodos propostos pelo Lean Helthcare se integram com os requisitos da acreditação ONA para um melhor serviço de saúde. Concluiu-se que a maior dificuldade enfrentada durante a implantação destes modelos é a resistência dos colaboradores às mudanças de cultura dentro da Organização.

Palavras-Chaves: Gestão Enxuta, Acreditação Hospitalar, Lean Healthcare.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as organizações que compõem os sistemas de saúde foram envolvidas pelo movimento em busca da qualidade total e da melhoria contínua, trazendo mudanças não só nas suas tarefas rotineiras, mas também no processo de tomada de decisões estratégicas. A acreditação, depois de ser amplamente utilizada na indústria, tem ganhado espaço na área da saúde por fornecer informações sobre o cumprimento de padrões de qualidade (Berto et al., 2017).

Diante desse novo cenário, a qualidade passa a trabalhar com o conceito de uma gestão participativa e descentralizada, tendo como principais pontos de foco: o trabalho em equipe, a gestão integrada, a melhoria contínua dos colaboradores e dos processos. Propondo mudanças na cultura da organização que acarretam a minimização de custos voltados à correção de eventuais falhas nos processos (Migliorini, 2021).

Segundo Souza (2008), Lean Healthcare, ou Produção Enxuta aplicada à saúde, aparece como uma solução eficaz para gerar melhorias em organizações da saúde. Ainda segundo Souza, diversos autores têm atribuído sucesso ao Lean Healthcare, pelo fato de este levar a resultados expressivos e, principalmente, sustentáveis.

O Lean introduz uma série de práticas que visam aprimorar a gestão organizacional. Este modelo propõe a constante eliminação de desperdícios nos processos, a maximização do valor em toas as atividades, uma resolução diária a resolução de problemas e ao desenvolvimento de pessoas (Saúde Business, 2024). Amplamente adotado por hospitais e clínicas, esta metodologia tem se destacado na otimização da medicina intensiva e no apoio a busca pela acreditação hospitalar.

Da mesma forma, a Acreditação é uma ferramenta de avaliação, que certifica a qualidade dos serviços prestados nas instituições de saúde, com característica educativa, focada na melhoria contínua e na segurança do paciente (ONA, 2013).

Mediante o contexto apresentado, as políticas da qualidade na área da saúde estão voltadas a desenvolver estratégias com o intuito de fomentar a competitividade no mercado, garantindo a segurança assistencial (Viana, 2011). Considerando também a complexidade dos processos operacionais e assistenciais desenvolvidos nos hospitais e aliado ao interesse do Ministério da Saúde no que tange à qualificação destes serviços, diversas instituições têm buscado pela acreditação hospitalar.

O instrumento de avaliação voluntária de serviços hospitalares da ONA alcançou grandes avanços em relação aos seus antecessores e mesmo a outros modelos disponíveis no Brasil. O presente instrumento possui conteúdo adaptado à realidade brasileira, seguindo a legislação nacional vigente. Os instrumentos de avaliação são flexíveis para serem progressivamente modificados, levando em consideração as grandes diferenças regionais e os diferentes graus de complexidade das instituições (Berto et al., 2017).

Segundo a Saúde Business (2024), a otimização e padronização de processos, assim como a redução de desperdícios, são elementos essenciais tanto para a acreditação como para o Lean. Essa sinergia é evidente em diversas instituições de saúde pelo Brasil.

O objetivo deste trabalho é determinar de que forma os métodos propostos pelo Lean Helthcare se integram com os requisitos da acreditação ONA como ferramentas complementares que permitam o desenvolvimento de um serviço de saúde de melhor qualidade. Para isso vamos buscar uma correlação das Dimensões da Qualidade e dos Fundamentos de Gestão da ONA com os princípios e ferramentas da Produção Enxuta.

2 A ACREDITAÇÃO ONA

O processo de acreditação é uma ferramenta desenvolvida para auxiliar as organizações a avaliarem seus processos e a identificarem onde são necessárias melhorias. É também uma abordagem objetiva, mensurável e de aplicação fácil e coerente. A avaliação é realizada de forma transversal, ou seja, a abordagem sistêmica permite analisar os processos de trabalho e as relações com os resultados (ONA, 2025). É um processo externo e voluntário, no qual uma organização, geralmente de caráter não governamental, faz a avaliação periódica das instituições de saúde com o objetivo de determinar se estas cumprem o conjunto de padrões elaborados para melhorar a qualidade dos cuidados que são prestados aos pacientes (Cardoso & Ribeiro, 2017).

A Organização Nacional de Acreditação (ONA) é responsável pelo desenvolvimento e gestão dos padrões brasileiros de qualidade e segurança em saúde.

A Acreditação ONA é um método de avaliação e certificação que busca, por meio de padrões e requisitos previamente definidos, promover a qualidade e a segurança da assistência no setor de

saúde. Para ser acreditada, a organização precisa comprovadamente atender aos padrões definidos pela ONA, reconhecidos internacionalmente.

Segundo a ONA (2021), os padrões ONA podem ser adotados por Organizações Prestadoras dos Serviços de Saúde (OPSS):

a) Serviços Hospitalares;

b) Serviços de Hemoterapia;

c) Serviços Laboratoriais;

d) Serviços de Nefrologia e Terapia Renal Substitutiva;

e) Serviços de Diagnóstico por Imagem, Radioterapia e Medicina Nuclear;

f) Serviços Ambulatoriais;

g) Serviços de Pronto Atendimento;

h) Serviços de Atenção Domiciliar;

i) Serviços Oncológicos;

j) Serviços de Medicina Hiperbárica;

k) Serviços de Anatomia Patológica;

l) Serviços de Atenção Primária à Saúde;

m) Serviços de Atendimento Pré-Hospitalar e Transporte Inter-hospitalar;

n) Serviços de Telemedicina/Telessaúde;

o) Serviços Odontológicos.

O Manual Brasileiro da Acreditação (MBA) é o instrumento de avaliação desenvolvido para verificar a qualidade da assistência à saúde em todas as Organizações Prestadoras de Serviços de Saúde (OPSS), tendo como base padrões e requisitos de complexidade crescente (Nível 1, Nível 2 e Nível 3). É a referência nacional para ser utilizado pelas Instituições Acreditadoras Credenciadas (IAC) do Sistema

Brasileiro de Acreditação (SBA), coordenado pela ONA, atualizado periodicamente em seus níveis, padrões e requisitos.

Figura 1 – Níveis de acreditação ONA



Fonte: ONA (2021)

O entendimento do conceito de qualidade em saúde no SBA é multidimensional, ou seja, as Dimensões da Qualidade orientam a avaliação do desempenho das organizações de saúde frente aos padrões e requisitos definidos, ou seja, é através das Dimensões da Qualidade que ocorre a medição dos resultados da organização em relação aos padrões e atendimento aos requisitos.

E para consolidar o Modelo Conceitual da metodologia do SBA, é estruturado um conjunto de Fundamentos de Gestão em Saúde, que caracterizam a metodologia e sustentam a avaliação das práticas e fatores de desempenho, expressos através dos padrões e requisitos do Manual das Organizações Prestadoras de Serviços de Saúde.

Figura 2 – Modelo Comceitual



Fonte: ONA (2021)

A seguir estão listadas as Dimensões da Qualidade e os Fundamentos de Gestão em Saúde utilizados pela metodologia SBA.

2.1 Dimensões da Qualidade

As Dimensões da Qualidade orientam a avaliação do desempenho organizacional frente aos requisitos definidos, ou seja, é através das Dimensões da Qualidade que ocorre a avaliação das práticas da organização em relação aos requisitos apresentados. Todas as dimensões são consideradas na avaliação para acreditação, pois orientam a avaliação por requisitos (ONA, 2021):

a) Segurança: Evitar lesões aos pacientes pelos cuidados que se destinam a ajudá-los.

b) Efetividade: Prestar serviços baseados no conhecimento científico a todos que poderiam se beneficiar e abstendo-se de prestar serviços àqueles que provavelmente não se beneficiariam (evitando a subutilização e mau uso). Em outras palavras, é não cometer excessos, muito menos deixar de realizar quaisquer medidas, desde que sempre seja observado o princípio de fazer a coisa certa, para a pessoa certa, na hora certa.

c) Centrado no Paciente: Fornecer cuidados que respeitam e respondem às preferências, necessidades e valores individuais dos pacientes/clientes e garantindo que os valores, dos pacientes/clientes, orientem todas as decisões clínicas.

d) Oportuna: Reduzir as esperas e, por vezes, e os atrasos prejudiciais tanto para quem recebe quanto para aqueles que prestam cuidados.

e) Eficiência: Oferecer uma assistência aos pacientes/clientes de maneira racional, evitando desperdícios, sem excessos, seja na utilização de um equipamentos, exames, leitos, procedimentos, suprimentos, ideias, energia e recursos humanos.

f) Equidade: Fornecer cuidados que não variam em qualidade devido à características pessoais como gênero, etnia, localização geográfica e status socioeconômico.

2.2 Fundamentos de Gestão

Já a ONA (2017), define que os Fundamentos de Gestão são um conjunto de fundamentos, que caracterizam a metodologia e sustentam a avaliação das práticas e fatores de desempenho, expressos através dos padrões e requisitos do Manual das Organizações Prestadoras de Serviços de Saúde.

a) Visão sistêmica: Forma de entender a organização como um sistema integrado onde todos os processos da organização estão interligados e suas relações são de interdependência. Por ser um sistema integrado, o desempenho de um componente e ou processo do sistema pode afetar não apenas a própria organização, mas todas as suas partes interessadas.

b) Liderança: Mecanismos de liderança, estratégia e controle colocados em prática para avaliar, direcionar e monitorar a gestão, com atuação de forma aberta, participativa, inovadora e motivadora. Orientação de esforços, interesses e recursos organizacionais, compreendendo os fatores que afetam a organização a curto e longo prazos, visando à sua sustentabilidade.

c) Gestão por processos: Gestão baseada na melhoria contínua dos processos críticos alinhados à visão e as estratégias da organização, focando constantemente nas necessidades dos clientes. Objetiva a tomada de decisão e a execução de ações, com base na medição e análise do desempenho dos resultados dos processos, considerando as informações disponíveis e os riscos identificados.

d) Desenvolvimento de pessoas: Engajamento ativo que promove a realização profissional e as relações humanas, através do comprometimento, do trabalho em equipe, do desenvolvimento de competências e habilidades e da educação permanente, potencializando o desempenho pessoal e organizacional.

e) Governança Clínica: Estrutura por meio da qual as organizações são responsáveis por melhorar continuamente a qualidade de seus serviços e salvaguardar altos padrões de atendimento, criando um ambiente favorável a excelência em atendimento clínico. São componentes da Governança Clínica a efetividade clínica, a auditoria clínica, gerenciamento de riscos, comunicação clara e transparente, pesquisa e educação perante e desenvolvimento de profissionais.

f) Integralidade e continuidade do cuidado: Integração de ações preventivas, curativas, individuais e coletivas nos cuidados em saúde, refletidas na articulação da continuidade dos cuidados entre os componentes do sistema e níveis de atenção em saúde, ou seja, entre ações preventivas e assistenciais, buscando um atendimento integral com ênfase na prevenção sem descuidar da assistência aos pacientes/clientes e comunidades.

g) Responsabilidade socioambiental: Relação responsável, ética e transparente da organização, por meio da potencialização de impactos positivos e minimização de impactos negativos de suas atividades na sociedade e no meio ambiente, promovendo o uso racional e adequado de recursos.

h) Cultura da inovação: Promoção de um ambiente favorável à melhoria de seu desempenho e de sua vantagem competitiva, com a implementação de novas ideias que possam gerar melhores resultados, a partir de um embasamento referenciado na ética, em boas práticas e em evidências científicas.

i) Melhoria contínua: Compromisso de identificar, analisar e avaliar a situação existente, de forma sistemática e planejada, com base em dados e informações, visando aprimorar produtos, serviços ou processos que possam desenvolver a organização, objetivando melhor desempenho.

j) Ética e transparência: Condição implícita vinculada à formação do indivíduo com parâmetros de honestidade, decência e respeito a todos os públicos interessados.

k) Natureza não prescritiva: Ausência de recomendação sobre métodos, técnicas e ferramentas a serem escolhidos para alcançar os padrões estabelecidos.

l) Alta confiabilidade: Compromisso no desenvolvimento e disseminação da gestão de riscos e cultura da segurança do paciente em todos os níveis da organização, além de respostas em modo e tempo oportunos, demonstrando constante busca pelo alto grau de confiabilidade de suas atividades.

2.3 Indicadores de desempenho em saúde

A implantação de um processo de avaliação e certificação da qualidade nos serviços de saúde tende a promover a melhoria dos serviços, assegurando assim a qualidade contínua na atenção destinada aos pacientes (Alonso, 2014).

Nesse sentido, é necessário o controle da qualidade e da assistência fundamentado em avaliações sistematizadas no cuidado à saúde, por meio de indicadores que demonstrem sua evolução ao longo do tempo, permitindo a comparação com referenciais internos e externos (Gabriel et. al., 2011).

A Acreditação Hospitalar ONA recomenda 9 indicadores capazes de avaliar o serviço prestado pela instituição de saúde, são eles:

a) Taxa de ocupação: traça o percentual do total de atendimentos realizados pela quantidade de leitos disponíveis por dia.

b) Intervalo de substituição: tempo médio que o centro cirúrgico permanece ocioso (multiplicar a média de permanência pelo percentual de desocupação e dividir o resultado alcançado pela porcentagem de ocupação).

c) Tempo médio de permanência: total de atendimentos realizados no dia (Contabilizar o número total de internações).

d) Indicadores de rentabilidade: trata-se do retorno financeiro.

e) Faturamento: Seria as contas a pagar e receber e percentual de glosas.

f) Satisfação do paciente: mede a satisfação do paciente em relação ao serviço prestado.

g) Avaliação da produtividade clínica: trata-se dos indicadores que avaliam os serviços de maior retorno financeiro, como: procedimentos complexos, cirurgias e consultas especializadas.

h) Avaliação da produtividade da equipe: avaliação dos serviços prestados e seu retorno financeiro,

i) Taxa de mortalidade: número de óbitos em um período determinado.

Os indicadores de desempenho devem avaliar a qualidade no cuidado, e são fundamentais para subsidiar novas práticas. No âmbito específico da gestão hospitalar, é necessário mudar o foco do "fazer" e do "como fazer", para o "porque fazer" e "o que fazer". (Migliorini, 2021)

3 O LEAN HEALTHCARE

O Lean surgiu no Sistema Toyota de Produção (Toyota Production System – TPS), no Japão pós-Segunda Guerra Mundial e teve sua criação atribuída ao engenheiro Taiichi Ohno. Os resultados alcançados foram excelentes, decorrentes das práticas implementadas com o foco na eliminação do desperdício para atribuir maior rapidez e flexibilidade aos processos, para entregar aos clientes o que eles desejavam, quando desejavam, com o máximo de qualidade e a um custo justo (Liker, 2015).

A Toyota compreendeu que, sob a ótica do cliente, muitos dos custos de produção do sistema de produção em massa são gerados por atividades que não agregam valor ao produto, e assim, deveriam ser eliminadas, ou reduzidas ao máximo. Segundo Hines e Taylor (2000), as atividades dentro de uma empresa podem ser classificadas da seguinte maneira:

a) Atividades que agregam valor (AV): atividades que tornam o produto ou serviço mais valioso para o cliente.

b) Atividades necessárias que não agregam valor (NAV): atividades que não tornam o produto ou serviço mais valioso aos olhos do cliente final, mas que são necessárias, sendo classificadas como muda tipo 1.

c) Atividades que não agregam valor (NAV): atividades que não tornam o produto ou serviço mais valioso para o cliente e não são necessárias mesmo nas atuais circunstâncias, sendo classificadas como muda tipo 2.

De acordo com Araújo (2004), o foco da produção enxuta difere da produção em massa pela busca de eliminação do desperdício por meio do combate aos mudas tipo 1 e 2, enquanto a produção em massa foca suas preocupações nas atividades que agregam valor.

Utilizando a mesma linha de “pensamento enxuto” do Lean Manufacturing na indústria, o Lean Healthcare também busca identificar e diferenciar na perspectiva do cliente, o que agrega do que não agrega valor, a conexão de etapas necessárias no fluxo de valor, para que o processo siga sem interrupções e retrabalhos, sendo a necessidade puxada pela demanda, justificando a sua motivação pela busca da eliminação de desperdícios através da redução do tempo entre a entrega final e o pedido do cliente (Silva. et al., 2011).

O Lean Healthcare mostra que um processo (conjunto de ações ou etapas) para ser perfeito deve ser feito corretamente, na sequência e no momento correto, criando o máximo valor para um paciente. Sendo assim, os processos devem manter um fluxo contínuo em que cada etapa é valiosa (adquire valor para o cliente), hábil (apresenta continuamente bons resultados), útil (além da qualidade também produz o resultado desejado), conforme (sem atrasos) e flexível. A presença de falhas em qualquer uma dessas circunstâncias gera desperdícios (Resende, 2010).

Segundo Manos (2006) e George (2003) apud Resende (2010), o Lean Healthcare é capaz de identificar 7 tipos de desperdícios focados em serviços de saúde, sendo eles:

a) Estoque: produção mais rápida de testes, papeladas ou requerimentos antes da necessidade do próximo processo;

b) Excesso de processamento: trabalhar mais no processo do que o necessário para o cliente, resultando em esperas, filas de pessoas, e-mails sem resposta e solicitação de documentos pendentes;

c) Movimentação: realizar movimentos desnecessários, colaboradores fazem várias viagens para executar suas tarefas;

d) Transporte: movimentação desnecessária de trabalho, podendo ser de pacientes, testes, materiais ou informações. Solicitações que passam de um colaborador ou departamento para o outro, sem que haja o reconhecimento de um “responsável” do processo;

e) Superprodução: executar mais do que o solicitado pelo cliente/ paciente;

f) Defeitos: não atender os requisitos do cliente, causando insatisfação no mesmo. Nos processos grande parte dos defeitos são causados por informações ou instruções incorretas.

g) Espera: espera entre uma atividade e outra, causando um desperdício que não pode ser recuperado, seja por um paciente esperando por um leito de internação ou por um profissional à espera de um instrumento para finalizar sua atividade.

O Lean reúne um conjunto de princípios e técnicas, estando os princípios associados à filosofia da empresa e constituindo os alicerces que direcionam as ações estratégicas enxutas, enquanto as técnicas são os meios pelos quais os princípios são atingidos e mantidos (Godinho, 2004). Segundo Womack e Jones (1996), os princípios do Lean são:

a) Determinar o valor para o cliente: a empresa deve definir o que realmente é valor sob o ponto de vista do cliente, determinar o que efetivamente gere resultados que o cliente esteja disposto a pagar.

b) Definir o fluxo de valor: a empresa não deve enxergar suas atividades pontualmente, mas sim toda a sequência de operações e atividades que agregam e que não agregam valor no processo produtivo.

c) Manter o fluxo contínuo: Produzir em lotes unitários, com cada item sendo imediatamente passado ao processo seguinte evitando assim gerar estoques ou paradas.

d) Produção puxada: Onde não for possível implantar fluxo contínuo, deve-se produzir somente quanto o processo cliente requerer, evitando superprodução e estoques.

e) Perfeição: Seguindo uma cultura de melhoria contínua, as possibilidades de melhoria são sempre infinitas. Em outras palavras, a produção enxuta busca a perfeição, um objetivo inalcançável e assim, sempre passível de atividades de melhoria.

Segundo Stender et al. (2018) e Bertani (2012), algumas das técnicas utilizadas no Lean são:

a) Mapeamento do Fluxo de Valor (MFV): é uma ferramenta que ajuda a enxergar o fluxo de material e de informações à medida que o produto segue o fluxo de valor. É uma ferramenta simples, porém poderosa, que, além de permitir uma visão sistêmica do fluxo de valor, apresenta as seguintes possibilidades: identificar facilmente as fontes de desperdícios do fluxo; tornam as decisões sobre o fluxo visíveis, contemplando, inclusive detalhes; prioriza a implantação de atividades com âmbito global; mostra a relação entre fluxo de informação e de materiais; fornece a informação de como sua unidade produtiva deveria operar para criar este fluxo.

b) Just in time: pode ser definido como um sistema é um sistema de produção em que o produto chega ao local necessário, para seu uso ou venda, no momento exato em que for necessário. Em outras palavras, o JIT estabelece que a organização deve produzir o item certo no tempo certo e na quantidade certa.

c) Kanban: Ferramenta de sinalização cujo objetivo é o de controlar os fluxos de produção de forma visual através de um cartão colorido, isto busca agilizar a rotina em que for implementada desde a movimentação de peças ao pagamento de fluxos financeiros.

d) 5s: O programa 5S é estruturado por cinco sensos que permitem a separação e o descarte do que não é necessário, incentivo a práticas saudáveis e que melhorem a saúde do colaborador e a autodisciplina necessária para manter o programa em funcionamento.

e) Takt Time: Ritmo de produção necessário para o atendimento a uma demanda, sendo esta variável de acordo com a demanda necessária do dia.

f) Manutenção Produtiva Total: é um método de manufatura que visa, maximizar a eficiência de um equipamento ao longo de toda a sua vida útil.

g) Poka Yoke: Dispositivo contra erros que busca evitar interrupções ao processo produtivo e prevenção de acidentes de trabalho, esta técnica visa reduzir a ocorrência de erro humano no processo produtivo.

h) Seis Sigma: Conjunto de práticas estatísticas com objetivo de melhoria sistemática dos processos para redução dos defeitos. Seu principal objetivo é o de resultados planejados e de forma clara que possibilitem ganho financeiro.

i) Kaizen: Também conhecido como programa de melhoria contínua, é baseada no comprometimento, esta forma de gestão é orientada ao incremento da produtividade e o retorno financeiro para a atividade, sem que esta influa diretamente nos custos.

j) SMED ou Troca Rápida de Ferramentas: SMED é a abreviação da expressão em inglês Single Minute Exchange of Die e refere-se a uma série de princípios para realizar troca de ferramentas (setups) em tempos com um único digito, ou seja, inferior a 10 minutos. O tempo de setup é definido como o tempo entre a fabricação da última peça boa do produto A até a primeira peça boa do produto B. O princípio do SMED é realizar o maior número de atividades do setup externamente, ou seja, com a

máquina em funcionamento diminuindo o tempo que a máquina fica parada, possibilitando aumento de produtividade e/ou aumento de flexibilidade.

k) Trabalho Padronizado: é o estabelecimento de procedimentos precisos para o trabalho de cada um dos operadores em um processo de produção. A melhoria contínua depende da padronização dos trabalhos. Qualquer tarefa ou processo desempenhado por uma pessoa deve ser documentado, repetitivo e seguro, de tal forma a gerar produtos em conformidade com o planejado.

l) Nivelamento de produção ou Heijunka: nivelamento do tipo e da quantidade de produção durante um período fixo de tempo. Isso permite que a produção atenda eficientemente às exigências dos clientes, ao mesmo tempo em que evita excesso de estoque, reduz custos e o lead time de produção em todo fluxo de valor.

m) Nivelamento de trabalho: Distribuição dos elementos de trabalho entre os operadores de forma a nivelar a carga de trabalho e adequar ao takt time (ritmo de produção para atender as necessidades do cliente).

4 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A metodologia adotada para este estudo encontra seu fundamento no método hipotético-dedutivo. Este método “baseia-se na ideia de que toda pesquisa inicia-se com um problema e com uma solução possível que é convertida em hipótese [...]. A hipótese norteia a pesquisa, sendo submetida a testes para que se possa verificar se é ou não a solução do problema” (Martins & Theóphilo, 2009).

Quanto aos objetivos, a pesquisa é classificada como descritiva (Gil, 2010), tendo foco central na preocupação em observar os fatos, registrá-los, analisá-los e interpretá-los, sem a interferência nem manipulação do pesquisador (Andrade, 2002).

Quanto ao método, empregou-se a pesquisa documental que, de acordo com Silva e Grigolo (2002), recorre a materiais que ainda não receberam nenhuma análise aprofundada. Visa, dessa forma, selecionar, tratar e interpretar informações brutas, em busca pela extração de algum sentido, agregando-lhe valor, a fim de contribuir para o incremento do conhecimento científico.

O último passo foi caracterizado pela construção das hipóteses, entendidas com suposição ou explicação provisória do problema (Gil, 2010) ou com um enunciado conjectural das relações entre duas ou mais variáveis (Kerlinger, 1980).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tanto o Lean como a acreditação hospitalar buscam atingir patamares muito similares. Por exemplo, reduzir o retrabalho, melhorar a funcionalidade dos processos, diminuir as etapas que não agregam valor, entre outras. (Saúde Business, 2024)

O objetivo deste capítulo é correlacionar as Dimensões da Qualidade e dos Fundamentos de Gestão da ONA com os princípios e ferramentas da Produção Enxuta. (Quadro 1) e analisar de que forma os métodos propostos pelo Lean Helthcare se integram com os requisitos da acreditação ONA como ferramentas complementares que permitam o desenvolvimento de um serviço de saúde de melhor qualidade

Quadro 1 – Contribuição do Lean Helthcare com a acreditação ONA

Dimensão da Qualidade ou Fundamento de Gestão ONA	Princípios e Ferramentas do Lean Helthcare
Segurança	Mapeamento do Fluxo de Valor Poka Yoke Trabalho Padronizado
Efetividade	Just in Time Kanban Seis Sigma Kaizen Trabalho Padronizado 5S Perfeição
Centrado no Paciente	Determinar o valor para o cliente Nivelamento de produção ou Heijunka Takt Time Kanban
Oportuna	Manter o fluxo contínuo Just in Time Manutenção Produtiva Total Takt Time SMED ou Troca Rápida de Ferramentas Nivelamento de produção ou Heijunka Nivelamento de Trabalho
Eficiência	Determinar o valor para o cliente Manter o fluxo contínuo Produção puxada Manutenção Produtiva Total Kanban 5S Kaizen

Dimensão da Qualidade ou Fundamento de Gestão ONA	Princípios e Ferramentas do Lean Helthcare
	Trabalho Padronizado Perfeição
Equidade	Manter o fluxo contínuo 5S Trabalho Padronizado
Visão sistêmica	Definir o fluxo de valor Mapeamento do Fluxo de Valor Manter o fluxo contínuo Produção puxada Seis Sigma Nivelamento de produção ou Heijunka Nivelamento de trabalho Perfeição
Liderança	Determinar o valor para o cliente Definir o fluxo de valor Mapeamento do Fluxo de Valor Kaizen Nivelamento de produção ou Heijunka Perfeição
Gestão por processos	Determinar o valor para o cliente Definir o fluxo de valor Mapeamento do Fluxo de Valor Kanban Seis Sigma Nivelamento de produção ou Heijunka
Desenvolvimento de pessoas	Perfeição 5S Poka Yoke Nivelamento de trabalho
Governança Clínica	Perfeição Mapeamento do Fluxo de Valor Seis Sigma Kaizen
Integralidade e continuidade do cuidado	Mapeamento do Fluxo de Valor Manter o fluxo contínuo Manutenção Produtiva Total Takt Time Kanban Trabalho Padronizado
Responsabilidade socioambiental	Perfeição Mapeamento do Fluxo de Valor 5S Kaizen

Dimensão da Qualidade ou Fundamento de Gestão ONA	Princípios e Ferramentas do Lean Helthcare
Cultura da inovação	Perfeição Poka Yoke 5S Kaizen
Melhoria contínua	Determinar o valor para o cliente Definir o fluxo de valor Perfeição Kaizen Nivelamento de produção ou Heijunka
Ética e transparência	Perfeição Mapeamento do Fluxo de Valor Seis Sigma Kaizen
Natureza não prescritiva	Definir o fluxo de valor Seis Sigma Kaizen
Alta confiabilidade	Mapeamento do Fluxo de Valor Poka Yoke Nivelamento de produção ou Heijunka Trabalho Padronizado

Fonte: Os Autores (2025)

Para se entender melhor cada dimensão, fundamento, princípio e ferramenta e relacionar objetivamente as potenciais contribuições do Lea Heathcare com a ONA, foram analisadas não só o título destes elementos, mas seus objetivos, conceitos e definições.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da revisão bibliográfica obteve-se respostas sobre alguns dos princípios e ferramentas de Lean Heathcare que são utilizadas pelos hospitais acreditados ONA, e também evidenciou-se que estas mesmas ferramentas demonstraram papel relevante no processo de acreditação dos hospitais. Fica evidente durante a pesquisa que a acreditação gera muitos benefícios, como: garantia da segurança do paciente e de melhor gerenciamento dos recursos, além de um melhor controle dos processos da organização e os princípios e ferramentas de Lean são diretamente ou indiretamente responsáveis por parte desse sucesso.

As ferramentas do Lean, assim como o processo de acreditação, são fatores competitivos e que se tornam diferenciais para uma organização, auxiliando na melhoria de processos tanto internos como externos.

Ainda assim, os hospitais demonstraram pouco conhecimento sobre algumas ferramentas do Lean, faz-se necessário estudos mais efetivos sobre as ferramentas e seus benefícios voltados para a saúde para que no futuro haja uma maior aplicabilidade desses métodos na saúde.

De acordo com a pesquisa, a maior dificuldade enfrentada durante o processo, tanto de implantação do Lean Healthcare quanto da acreditação ONA, é a resistência dos colaboradores às mudanças de cultura dentro da Organização.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. M. (2002). Como preparar trabalhos para cursos de pós-graduação: noções práticas. (5a ed.). São Paulo: Atlas.

BERTANI, Thiago Moreno. Lean Healthcare: Recomendações para implantações dos conceitos de produção enxuta em ambientes hospitalares. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BERTO, Andreia Maria et al. Acreditação hospitalar: uma complementaridade proveitosa para a gestão da produção. Sistemas & Gestão, v. 12, n. 4, p. 447-461, 2017.

CARDOSO, Sandra de Oliveira Soares; RIBEIRO, Gabriela Rodrigues. A excelência na qualidade hospitalar: um enfoque na acreditação ONA. Revista Processando o Saber, v. 9, p. 77-95, 2017.

GIL, A. C. (2010). Como elaborar projetos de pesquisa. (5a ed.) São Paulo: Atlas.

KERLINGER, F. (1980). Metodologia da pesquisa em ciências sociais: um tratamento conceitual. São Paulo: EPU.

LIKER, J. K. O Modelo Toyota: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo. Tradução de Lene Belon Ribeiro. Porto Alegre: Bookman, 2005.

MARTINS, G., & Theóphilo, C. R. (2009). Metodologia da Investigação Científica para Ciências Sociais Aplicadas. (2a ed), São Paulo: Atlas.

MIGLIORINI, Bruna Suelen Neves. A Acreditação ONA como instrumento de melhoria do desempenho organizacional de instituições de saúde. 2021. Tese de Doutorado. [sn].

ORGANIZAÇÃO NACIONAL DE ACREDITAÇÃO - ONA. The National System of Accreditation. Brasília (DF): Disponível em: [http://www.ona.org.br/noticia] acessado em: out/17, 2017.

ONA – Organização Nacional de Acreditação (a). Sobre a ONA. Disponível em: <https://www.ona.org.br/quem-somos/sobre-a-ona>. Consultado em: 06 de fevereiro de 2025.

ONA – Organização Nacional de Acreditação. Manual para organizações prestadoras de serviços de saúde - OPSS: versão 202-2026. -- São Paulo, 2021. -- (Coleção manual brasileiro de acreditação)

SAÚDE BUSINESS. Práticas de gestão enxuta otimiza cuidados intensivos e eleva certificação hospitalar. Disponível em: <https://www.saudebusiness.com/artigos/praticas-de-gestao-enxuta-otimiza-cuidados-intensivos-e-eleva-certificacao-hospitalar/>. Publicado em: 15 de abril de 2024.

STENDER, Gustavo Henrique Cordeiro et al. Panorama das operações de um almoxarifado hospitalar: Um estudo de caso sobre a aplicabilidade do lean healthcare num hospital da rede federal de saúde do Rio de Janeiro. Produto & Produção, v. 19, n. 1, 2018.

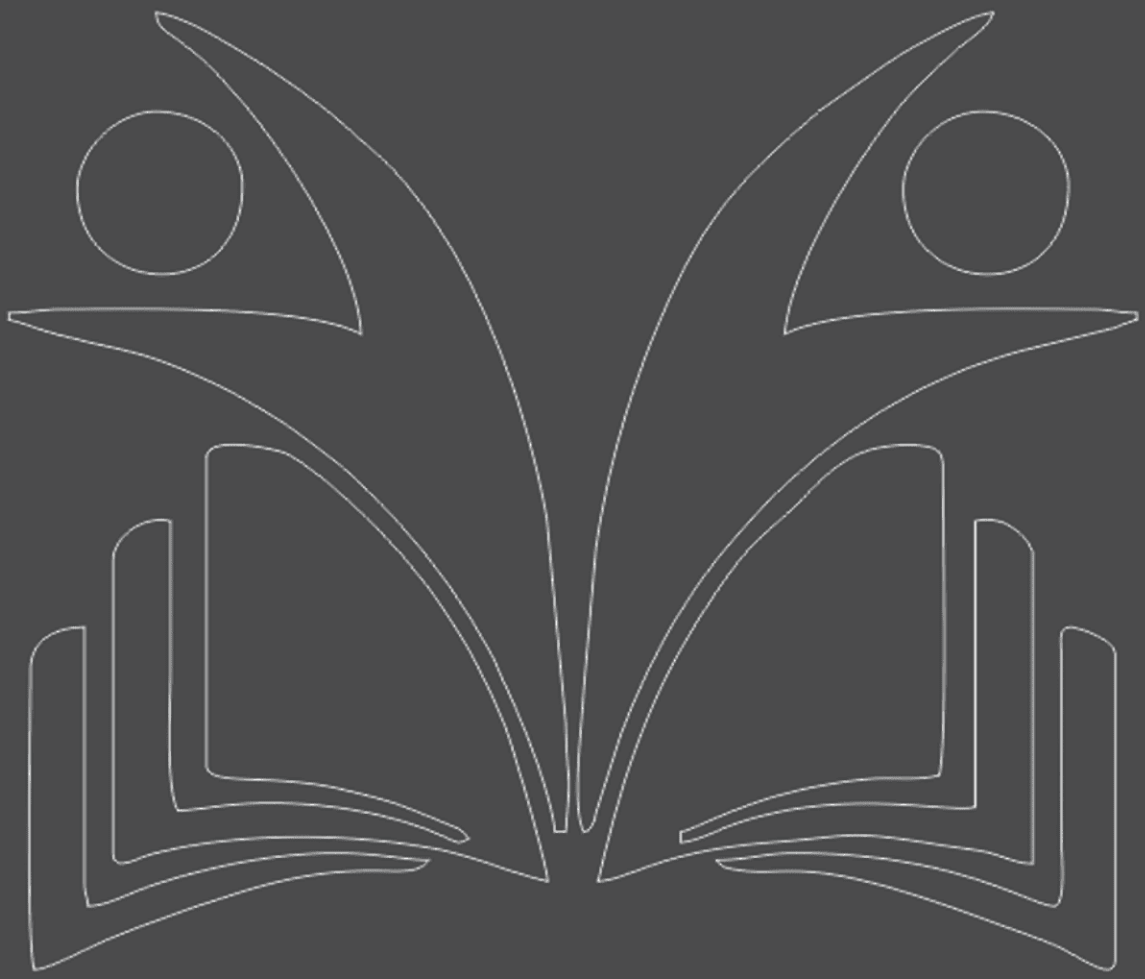
WOMACK, J. P.; JONES, D. T.. Lean thinking – banish waste and create wealth in your corporation. Nova Iorque: Simon & Schuster, 1996.

Capítulo 13

10.37423/260911396

INTEGRAÇÃO DE ANÁLISES ESTRUTURAIS, DINÂMICAS E ERGONÔMICAS NO PROJETO DE UM VEÍCULO OFF-ROAD BAJA SAE

Heron de Lima Gomes e Martins — *Instituto Federal da Paraíba*



RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um veículo off-road do tipo Baja, projetado pela equipe CAJABAJA para participação na competição estudantil BAJA SAE Brasil. A pesquisa tem como objetivo aplicar os conhecimentos de engenharia na concepção e validação de um protótipo que atenda aos critérios de desempenho, segurança e confiabilidade exigidos em ambientes extremos. O projeto foi desenvolvido a partir da análise e dimensionamento de subsistemas como chassi, suspensão, direção, sistema de freios, powertrain, eletrônica e ergonomia, integrando diferentes áreas da engenharia em uma abordagem prática e aplicada. As etapas de validação incluíram simulações estruturais, testes de desempenho e avaliações funcionais, com foco na eficiência mecânica e robustez do conjunto. A atividade foi conduzida nas instalações do Instituto Federal da Paraíba – Campus Cajazeiras, como parte de um projeto de extensão voltado ao desenvolvimento de soluções reais para desafios de competição. Os resultados demonstraram que o protótipo atende aos critérios técnicos da competição, apresentando desempenho adequado e confiabilidade nos cenários simulados, evidenciando o potencial formativo e inovador desse tipo de iniciativa acadêmica.

PALAVRAS-CHAVE: baja sae, protótipo off-road, validação estrutural, integração de subsistemas.

1 INTRODUÇÃO

Desenvolver um veículo para competições estudantis, como a BAJA SAE, é um processo desafiador que exige a integração de diferentes áreas da engenharia e a tomada de decisões estratégicas. Assim como a construção da imagem de uma marca demanda ações coordenadas e fundamentadas em princípios sólidos, o desenvolvimento de um protótipo competitivo requer planejamento criterioso, aplicação de normas e adoção de ferramentas que assegurem qualidade, segurança e desempenho.

A BAJA SAE é uma competição acadêmica de caráter internacional que promove o projeto e a construção de veículos off-road, desafiando equipes universitárias a conceberem soluções inovadoras para ambientes de uso extremo. Nesse contexto, a equipe CAJA-BAJA desenvolveu um protótipo integrando múltiplos subsistemas — cálculo estrutural, sistema de freios, powertrain, design e ergonomia, suspensão e direção, e eletrônica embarcada — de forma a garantir robustez mecânica, confiabilidade operacional e conforto ao condutor.

O projeto foi concebido no âmbito de um programa de extensão acadêmica voltado à participação na competição, com todas as decisões técnicas e escolhas de materiais fundamentadas em normas específicas, estudos científicos e metas de desempenho. A execução seguiu os critérios estabelecidos pelo regulamento RATBSB – Emenda 6, iniciando-se com a modelagem tridimensional no software SOLIDWORKS, que possibilitou a representação precisa do design estrutural. O comportamento cinemático da suspensão foi avaliado por meio do ADAMS CAR, enquanto o ANSYS foi utilizado em simulações por elementos finitos (FEA), garantindo maior confiabilidade e segurança estrutural.

Além das análises mecânicas e estruturais, o projeto incorporou uma avaliação ergonômica aprofundada do posto de condução, considerando normas como a ABNT NBR 6068 e a ISO 7250, bem como o método de avaliação postural RULA (Rapid Upper Limb Assessment). Com base em dados antropométricos reais, foram simuladas posturas do piloto, visando assegurar conforto, controle e segurança durante longos períodos de operação.

Os parâmetros essenciais para o dimensionamento foram definidos a partir de estimativas e referências acadêmicas, resultando em uma abordagem que alia rigor técnico, inovação e aplicação prática, consolidando o protótipo como uma solução competitiva e formativa no cenário das competições estudantis de engenharia

1.1 Objetivos

Apresentar o processo de concepção, desenvolvimento e validação de um protótipo de veículo off-road do tipo BAJA-SAE, integrando análises estruturais, dinâmicas, eletrônicas e ergonômicas, com base em normas técnicas, simulações computacionais e práticas de engenharia aplicada, visando atender aos critérios de desempenho, segurança e conforto exigidos pela competição.

1.2 Justificativa

Segundo Cerra e Maia (2008), observa-se uma deficiência significativa do mercado nacional em atender plenamente as demandas do setor automobilístico, especialmente no que se refere ao desenvolvimento de componentes veiculares. Essa limitação tem levado à dependência de suporte estrangeiro, tecnicamente mais preparado para suprir tais necessidades.

O desenvolvimento de um veículo para a BAJA SAE representa uma oportunidade singular de aplicação prática dos conhecimentos adquiridos na formação acadêmica, estimulando a inovação e a integração multidisciplinar. Projetos dessa natureza demandam não apenas soluções técnicas eficientes, mas também conformidade com normas e critérios que assegurem a viabilidade do protótipo em condições extremas.

Essa constatação evidencia a carência de políticas de incentivo e estruturação de uma base tecnológica nacional capaz de fomentar setores estratégicos da economia. Além disso, a inclusão da ergonomia como eixo técnico do projeto amplia o alcance da iniciativa, ao considerar não apenas o desempenho estrutural e dinâmico do veículo, mas também o conforto, a segurança e a saúde ocupacional do condutor. A relevância deste estudo reside na possibilidade de demonstrar como a integração entre engenharia estrutural, dinâmica e fatores humanos pode resultar em um protótipo mais competitivo, seguro e adaptado às necessidades do condutor, fortalecendo o papel da engenharia aplicada no ambiente acadêmico e industrial.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do protótipo Baja SAE exigiu o uso de múltiplas ferramentas computacionais, cada uma aplicada a uma etapa específica do projeto, abrangendo desde a modelagem tridimensional até

a validação estrutural, dinâmica, eletrônica e ergonômica do veículo. A seguir, são descritos os principais softwares empregados e suas respectivas finalidades técnicas:

- SolidWorks: Utilizado para a modelagem tridimensional (CAD) do veículo, permitiu a criação precisa das geometrias do chassi, suspensão, sistema de freio e demais componentes estruturais. Suas funcionalidades paramétricas viabilizaram ajustes dimensionais, verificação de interferências e a preparação dos modelos para análises posteriores, incluindo a simulação da postura do condutor com base em dados antropométricos.

- ADAMS Car: Software de simulação multicorpos empregado para análise cinemática e dinâmica da suspensão. Foram simuladas diferentes condições de operação, com avaliação de ângulos de cambagem, caster, convergência e identificação de comportamentos indesejados como bump steer e migração do centro de rolagem, otimizando a geometria do sistema suspensivo.

- ANSYS: Aplicado em simulações por elementos finitos (FEA), foi utilizado tanto em análises estruturais estáticas — para avaliar tensões e deformações no chassi e nos componentes críticos — quanto em análises térmicas transientes no sistema de freios. Essas análises possibilitaram prever elevação de temperatura durante frenagens prolongadas, fundamentando a escolha de materiais resistentes ao calor e o dimensionamento dos discos.

- SimSolid: Utilizado na análise da caixa de redução, esse software adota o método das aproximações externas, permitindo simulações de alta complexidade sem necessidade de simplificações geométricas. A ferramenta possibilitou análises rápidas e confiáveis de tensões e deslocamentos em componentes submetidos a cargas dinâmicas elevadas.

- Arduino IDE: Ambiente de desenvolvimento empregado na programação dos microcontroladores ESP32 da arquitetura eletrônica embarcada. Foram implementadas rotinas de aquisição de dados, integração com sensores e controle de sistemas críticos, como monitoramento térmico e comunicação por protocolo CAN. Sua flexibilidade e baixo custo tornaram viável a prototipagem funcional e os testes em pista.

• Avaliação Ergonômica (SolidWorks Manikin ou módulo equivalente): A simulação da postura do piloto e dos parâmetros antropométricos foi realizada no ambiente CAD do SolidWorks, utilizando bonecos de referência baseados em percentis 50 e 95. Foram avaliadas variáveis como ângulos de

tronco-coxa, joelho e alcance dos membros superiores, com apoio no método RULA para avaliação postural e suporte à tomada de decisão no design do cockpit

A seleção dessas ferramentas foi baseada em critérios de precisão, compatibilidade com os objetivos do projeto e aderência às melhores práticas da engenharia automotiva. A integração entre modelagem mecânica, simulações dinâmicas, análise ergonômica e controle eletrônico assegurou a robustez, a confiabilidade e a funcionalidade do protótipo desenvolvido.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento do protótipo do veículo off-road foi conduzido por meio de um estudo de caso aplicado, que abrangeu as etapas de projeto, modelagem, simulação e avaliação ergonômica fundamentadas em normas técnicas e práticas de engenharia. Esse processo teve como objetivo descrever e explorar as soluções técnicas adotadas para integrar múltiplos subsistemas — estrutural, dinâmico, eletrônico e ergonômico — a fim de garantir desempenho, segurança e conforto do protótipo.

Além disso, a pesquisa incluiu análise documental das normas técnicas vigentes, como o regulamento RATBSB – Emenda 6 e as normas ABNT NBR 6068 e ISO 7250, que embasaram as especificações técnicas e ergonômicas do projeto. Segundo Lüdke e André (1986), a análise documental é essencial para verificar e validar as informações contidas em fontes oficiais que fundamentam as práticas adotadas.

A combinação dessas metodologias (estudo de caso, análise documental e simulações computacionais), está sendo desenvolvido a construção de um protótipo robusto e alinhado com os requisitos técnicos e humanos exigidos pela competição.

3.1.1 Parâmetros para dimensionamento do protótipo

A definição dos parâmetros essenciais para o dimensionamento do veículo foi realizada a partir de uma combinação de estimativas iniciais e pesquisas bibliográficas em artigos acadêmicos especializados na área de veículos off-road e competições BAJA SAE. Essa etapa foi fundamental para estabelecer as bases técnicas que orientariam todo o desenvolvimento do protótipo, garantindo que as decisões de projeto estivessem alinhadas com práticas consolidadas e requisitos competitivos.

Foram consideradas variáveis relacionadas à massa total do veículo com piloto, distribuição de carga entre os eixos, dimensões geométricas, características do motor e especificações dos pneus, todas apresentadas na Tabela 1 a seguir:

TABELA 1. Parâmetros iniciais estimados

Parâmetro	Valor	Unidade
Peso total com piloto de 65 Kg	260	[kg]
Carregamento do eixo dianteiro	40	[%]
Carregamento do eixo traseiro	60	[%]
Distância entre eixos	1,5	[m]
Altura do Centro de Massa	0,35	[m]
RPM máximo do motor	3800	[rpm]
Torque máximo do motor	19,7	[Nm]
Diâmetro do pneu	0,5588	[m]

Fonte: Autor (2025)

Essa etapa foi fundamental para estabelecer as bases técnicas que orientariam todo o desenvolvimento do protótipo, garantindo que as decisões de projeto estivessem alinhadas com práticas consolidadas e requisitos competitivos.

O peso total com piloto foi estimado em 260 kg, considerando um piloto padrão de 65 kg, enquanto a distribuição de carga entre os eixos dianteiro e traseiro seguiu uma proporção de 40% e 60%, respectivamente, refletindo a dinâmica esperada para o veículo.

A distância entre eixos e a altura do centro de massa foram definidas com base em referências técnicas e dados antropométricos, buscando um equilíbrio entre estabilidade e agilidade. As especificações do motor, incluindo RPM máximo e torque máximo, foram adotadas conforme os motores típicos utilizados nas competições, influenciando diretamente o desempenho dinâmico e a capacidade de aceleração do veículo. Por fim, o diâmetro dos pneus foi selecionado para garantir adequação ao terreno e condições previstas nas provas.

Esses parâmetros iniciais, detalhados na Tabela 1, serviram como ponto de partida para as análises subsequentes de cálculo estrutural, simulação cinemática e avaliação ergonômica, assegurando que o protótipo atendesse aos critérios técnicos e regulamentos da competição.

3.1.2 Cálculo estrutural

O estudo do cálculo estrutural aplicada às análises do subsistema baseou-se nos princípios do Kaizen, valorizando a melhoria contínua e o aprendizado incremental. Essa abordagem cíclica permi-tiu a identificação sistemática de problemas, o planejamento e a implementação de soluções, segui-dos da avaliação rigorosa dos resultados alcançados. A Tabela 2, apresentada a seguir, sintetiza as etapas realizadas ao longo do processo de desenvolvimento e aprimoramento do subsistema.

TABELA 2. Métodos de análise

Etapa	Objetivo Específico	Meta Técnica	Ferramenta
Identifica ção de problemas	Mapear falhas, limitações ou pontos de melhoria em qualquer componente do veículo	Elaborar uma lista com no mínimo 3 problemas técnicos ou operacionais observados	Reunião técnica, checklist de inspeção, registro de testes
Análise e Diagnóstico	Investigar a causa-raiz dos problemas identificados	5 porquês ou Diagrama de Ishikawa	Documento de análise de causa
Planejam ento de Soluções	Definir ações corretivas e melhorias a serem implementados	Apresentar pelo menos duas soluções viáveis com análise de custo, impacto e viabilidade técnica	Planilha comparativa, Canvas de solução
Implementação das Melhorias	Aplicar as soluções propostas no componente ou processo	Concluir pelo menos um protótipo ou atualização do modelo com as melhorias incorporadas	Atualização de CAD, protótipo funcional
Verificação (testes)	Avaliar o desempenho e confiabilidade após a implementação	Comprovar redução de falhas ou aumento de desempenho em testes práticos ou simulações	Relatório de teste, gráficos de desempenho
Padronização	Documentar a nova solução como referência para projetos futuros	Atualizar documentos técnicos, fichas de processo e de dados da equipe	Manual técnico checklist de montagem atualizado

Fonte: Autor (2025)

Para a realização das análises de falhas, foram inicialmente definidas as condições de contorno e as cargas aplicadas aos componentes analisados bem como o tipo de elemento das malhas de acordo com a geometria do objeto a ser estudado. Uma exclusão a esta última etapa foram as análises na caixa de redução e engrenagens no Simsolid que utiliza o método das aproximações externas, possuindo uma discretização diferente.

3.1.3 Suspensão e direção

O projeto de suspensão do protótipo GOAT 2025, cujos parâmetros específicos constam na Tabela 3, foi desenvolvido com foco em otimizar o comportamento dinâmico do veículo para as condições extremas do Baja.

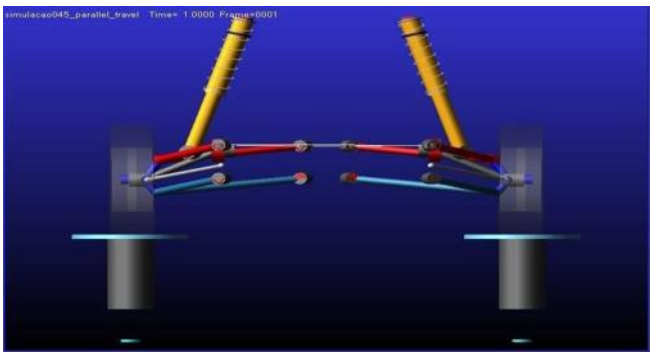
TABELA 3. Parâmetros da suspensão dianteira

Parâmetro	Especificação - Dianteira	Especificação - Traseira
Amortecedores	Fox Float 3	Fox Float 3 Evol
Camber	-2°	-1°
Caster	17°	0°
Kingpin	-7,3º	0°
Scrup Radius	54,5 mm	-
Toe Angle	-1°	-1°
Pró Dive	37,50%	60%
Bump	120 mm	120 mm
Rebound	-80 mm	-60 mm

Fonte: Autor (2025)

Suspensão Traseira - O foco principal do projeto é maximizar a capacidade de tração e a estabilidade. A geometria utiliza um elevado percentual de anti-squat para combater o afundamento da suspensão durante acelerações, o que mantém a transferência de carga ideal para as rodas e melhora o arranque. Os ângulos de alinhamento são configurados para garantir a estabilidade em retas e complementar a agilidade do veículo nas curvas, enquanto o curso da suspensão é otimizado para absorver os impactos do terreno mantendo o contato dos pneus com o solo.

FIGURA 1: Geometria da Suspensão Traseira



Fonte: Autor (2025)

Suspensão Dianteira - Os parâmetros da suspensão dianteira visam conferir ao veículo máxima estabilidade direcional e agilidade nas curvas através de ajustes de caster, camber e convergência que otimizam o auto alinhamento da direção e a aderência em curvas. A geometria foi projetada para garantir controle total em condições extremas, neutralizando o mergulho do veículo em frenagens fortes e absorvendo grandes impactos com um curso de suspensão que privilegia a compressão.

Na Tabela 3, é possível observar que foram adotados amortecedores de alta performance (Fox Float 3 na dianteira e Fox Float 3 Evol na traseira), oferecem resposta rápida e controle dinâmico. O camber negativo de -2° na dianteira melhora a aderência lateral, enquanto o caster de 17° contribui para a estabilidade direcional e retorno da direção após curvas. O ângulo de kingpin e o scrub radius foram definidos para reduzir esforços no volante e aumentar a precisão do controle. Por fim, o ângulo de toe negativo promove estabilidade em linha reta sem comprometer a capacidade de curvas, e o parâmetro de pró-dive evidencia a capacidade da suspensão de controlar o afundamento dianteiro durante frenagens. Esses parâmetros, combinados, configuram uma suspensão balanceada entre desempenho e segurança, adequada para os desafios da competição.

TABELA 3. Parâmetros da suspensão dianteira

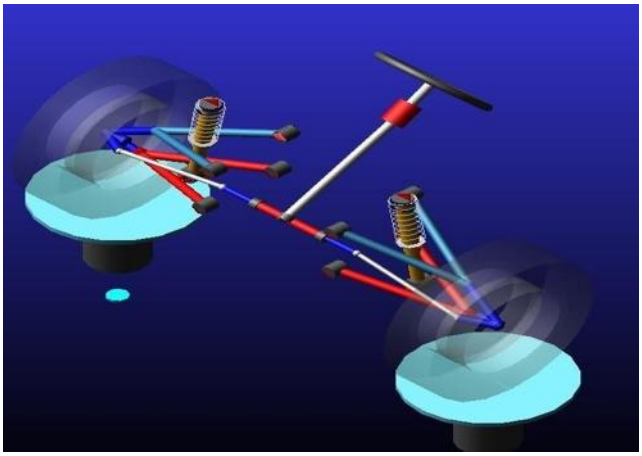
Parâmetro	**Especificação - Dianteira**	**Especificação - Traseira**
Amortecedores	Fox Float 3	Fox Float 3 Evol
Camber	-2°	-1°
Caster	17°	0°
Kingpin	-7,3º	0°
Scrup Radius	54,5 mm	-
Toe Angle	-1°	-1°
Pró Dive	37,50%	60%
Bump	120 mm	120 mm
Rebound	-80 mm	-60 mm

Fonte: Autor (2025)

Direção – O sistema de direção foi projetado com base na geometria de Ackerman, um princípio que assegura que a roda interna esterça em um ângulo maior que a roda externa durante as curvas. Essa configuração reduz significativamente o desgaste dos pneus, além de melhorar a eficiência da trajetória. No projeto, os ângulos de esterçamento alcançam 33,8° para a roda interna e 22,86° para a

roda externa, resultando em um raio de giro compacto de 2.976,12 mm, que favorece manobras rápidas e precisas em espaços restritos.

FIGURA 2: Geometria da Suspensão Dianteira e Direção



Fonte: Autor (2025)

O conjunto mecânico é formado por um sistema pinhão-cremalheira com relação direta 1:1, que proporciona resposta imediata ao comando do piloto, essencial para um veículo off-road de competição. O pinhão possui 12 dentes, com diâmetro de 25,5 mm e largura de 12,7 mm, enquanto as engrenagens apresentam módulo de 6,35 mm e ângulo de pressão de 20°, garantindo eficiência na transmissão do movimento e durabilidade do sistema. A cremalheira tem largura de 6,35 mm, assegurando resistência ao desgaste e estabilidade estrutural do conjunto. Esses aspectos técnicos refletem uma escolha equilibrada entre precisão, robustez e agilidade na direção.

3.1.4 Powertrain

O sistema de transmissão do veículo é composto por motor Honda GX390, CVT Comet 780, caixa de redução, semieixos e cubos de roda do Yamaha Rhino. Como primeiro projeto da equipe, priorizou-se confiabilidade, desempenho, facilidade de fabricação no campus e manutenção. Para as decisões de engenharia, foram utilizadas ferramentas como matriz de decisão e FMEA, visando selecionar os melhores componentes e identificar falhas críticas.

TABELA 4. Resumo dos Cálculos Necessários para Projeto da Transmissão

Etapa	Cálculo	Objetivo
Força Trativa	$F=\frac{Te \cdot Ntf \cdot ntf}{r}$	Garantir tração suficiente para vencer obstáculos

Torque nas rodas	$T=F \cdot r$	Verificar torque entregue pelo sistema
Dimensionamento dos eixos	Torção + Flexão combinadas	Garantir resistência sem falhas
Verificação de fadiga	Goodman/Soderberg	Confirmar segurança do sistema ao longo do tempo
Seleção de materiais	Aço 4340 / Aço 8620	Resistência mecânica e tratabilidade térmica
Relação de Transmissão	Definida por υ e T	Equilibrar torque, tração e velocidade final desejada

Fonte: Autor (2025)

Para avaliar a capacidade do sistema de transmissão em diferentes condições de operação, consideraram-se dois cenários: subida (situação A), com torque exigido de 1930,86 N·m, e plano (situação B), com 850,2 N·m. As forças estáticas envolvidas foram 1700,4 N na subida e 850,2 N no plano. A força trativa gerada foi de 2446,83 N, e o torque disponível nas rodas atingiu 595,57 N·m. A demanda de torque nas rodas foi de 414,07 N·m (situação A) e 207,14 N·m (situação B), valores inferiores ao torque disponível. O dimensionamento do eixo resultou em torques de 73,09 N·m, 207,08 N·m e 586,73 N·m, com flexões de 28,94; 1,78; e 3,63. Os materiais escolhidos foram aço 4340 e aço 8620.

3.1.5 Freios

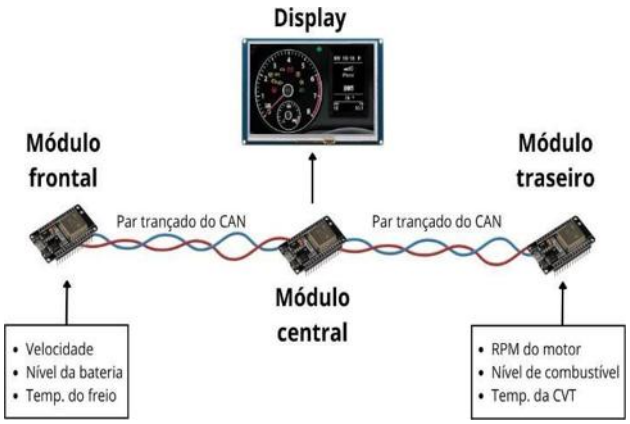
A subequipe de freios da CAJA-BAJA desenvolveu um sistema capaz de travar as quatro rodas do veículo off-road em diversos terrenos, priorizando segurança, ergonomia, durabilidade e baixo custo. Com base nos limites médios de força aplicável pelo pé direito de homens (823 N) e mulheres (445 N), segundo Limpert (1999), foi adotada uma força padrão de acionamento de 350 N para re-duzir o esforço do piloto em provas longas. O pedal possui relação de alavanca de 6:1, aumentando o torque de frenagem com menor esforço. O sistema utiliza um cilindro mestre duplo do Fusca com êmbolo de 19,5 mm, garantindo independência entre os circuitos dianteiro e traseiro. As linhas de freio são compostas por tubos rígidos de cobre 3/16" até os extremos do chassi, conectados a man-gueiras flexíveis com malha de aço, minimizando perdas por expansão das linhas. A configuração com discos e pinças flutuantes nas quatro rodas foi escolhida pela menor massa, maior facilidade de ma-nutenção e melhor dissipação térmica em relação a freios a tambor. Os discos têm 160 mm na dianteira e 140 mm na traseira, acompanhando a maior transferência de carga para o eixo dianteiro. A distribuição hidráulica conta com linhas independentes nas rodas dianteiras e uma linha única com conexão “T” na

traseira, garantindo controle e estabilidade, mantendo intencionalmente um menor torque traseiro para auxiliar na estabilidade sem comprometer o balanceamento do sistema.

3.1.6 Eletrônica

O subsistema eletrônico foi projetado para garantir segurança, confiabilidade e suporte à es-tratégia da equipe, por meio de um sistema de telemetria embarcada modular. A arquitetura é com-posta por quatro módulos interconectados: dois de aquisição (MAQ-01 e MAQ-02), um central (MCT) e um do box (MB). Os módulos comunicam-se via CAN (500 kbps) e LoRa (915 MHz), utilizando mi-crocontroladores ESP32 Heltec LoRa32 V2, escolhidos pela robustez, múltiplos protocolos (CAN, SPI, I^2C) e bom desempenho em ambientes agressivos.

FIGURA 3: Arquitetura Interna do Sistema Eletrônico.



Fonte: Autor (2025)

A decisão por uma arquitetura distribuída minimiza o cabeamento, isola falhas, distribui carga computacional e facilita a manutenção. Uma abordagem centralizada, embora mais simples, aumentaria os riscos por falha única e a complexidade do chicote elétrico em ambiente off-road.

Os parâmetros monitorados no sistema são: velocidade e RPM, para análise do desempenho dinâmico; temperaturas do freio e CVT, visando o monitoramento térmico e a antecipação de falhas; e nível da bateria, para prevenir falhas por baixa tensão. Caso valores críticos sejam detectados (ex: temperatura dos freios > 350 °C), alertas visuais são emitidos ao piloto e à equipe para ações corretivas imediatas. Os sensores utilizados foram: sensor indutivo NPN Lj12a3-4-z/Bx para velocidade e RPM do motor (imunes a poeira e vibração, validados via GPS, veículo comercial e tacômetro digital); MAX6675 com termopar tipo K para temperatura do freio (resistente a altas temperaturas, validado por termômetro

IR); MLX90614 para temperatura da CVT (medição sem contato, validado por termômetro IR); e sensor de tensão DC 0–25 V para o nível da bateria (fácil integração, validado com multímetro). O consumo elétrico estimado foi de até 1 A por módulo, com margem de segurança para fusíveis de 2 A. A alimentação utiliza 5 V regulado por conversor DC-DC buck a partir de uma bateria de 18 Ah, com autonomia estimada entre 5 e 6 horas. Bitola de 2,5mm² para cabos de alimentação e 0,5mm² para sensores.

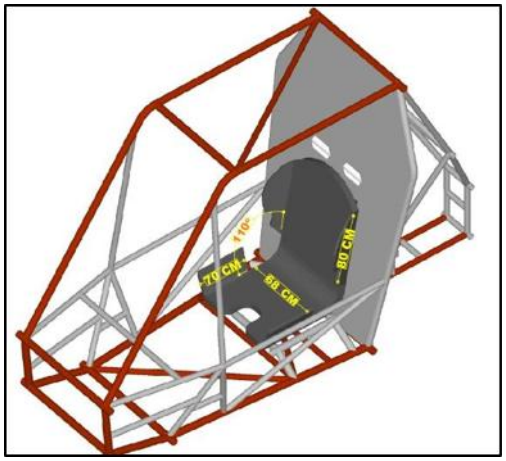
3.1.7 Desing e ergonomia

O chassi foi projetado conforme a norma ABNT NBR 6068, incorporando parâmetros ergonô-micos recomendados para garantir uma postura adequada do piloto durante a operação. As dimen-sões críticas, como a distância entre o banco e os pedais (915,75 mm) e o alcance do volante (578,24 mm), foram mantidas dentro dos valores ideais para facilitar o controle e a segurança.

No entanto, foram identificados desvios nos ângulos articulares, especialmente no tronco-coxa (80°) e no joelho (130°), que podem impactar negativamente o conforto durante longos perío-dos de uso. Esses ângulos fora do padrão recomendam ajustes para prevenir desconfortos e fadiga. O layout interno e o posicionamento do assento apresentam medidas de 70 cm de compri-

mento da base, 68 cm de profundidade e 80 cm de altura, com inclinação do encosto em 110°, bus-cando acomodar diferentes biotipos. No entanto, a análise identificou desvios em ângulos articulares, como tronco–coxa (80°) e joelho (130°), que se afastam das recomendações ergonômicas e podem comprometer o conforto em longos períodos de uso, aumentando o risco de fadiga muscular.

FIGURA 4: Arquitetura Interna do Sistema Eletrônico



Fonte: Autor (2025)

A postura sentada influencia diretamente no conforto e na saúde do piloto, pois afeta a dis-tribuição de pressão sobre a coluna vertebral e a ativação muscular necessária para manter a estabilidade postural, sobretudo nas regiões torácica e lombar. Uma má ergonomia pode acarretar em tensões musculares, dores e redução da performance operacional.

Para aprofundar a análise, aplicou-se o método RULA (Rapid Upper Limb Assessment), avali-ando braços, punhos, pescoço, tronco e pernas. Essa avaliação revelou riscos ergonômicos associa-dos ao acionamento dos pedais e ao manuseio do volante, destacando a necessidade de ajustes na geometria do assento e na disposição dos comandos.

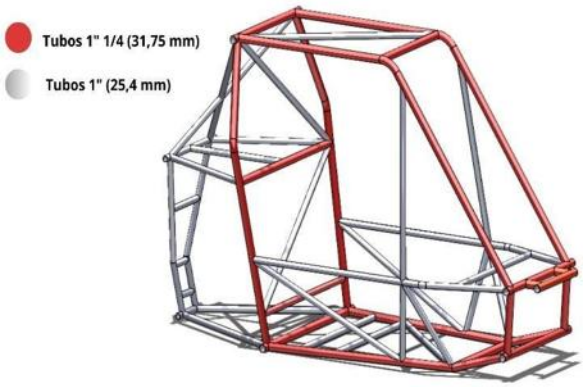
4 RESULTADOS

A partir deste ponto, são apresentados os resultados obtidos nas simulações estruturais do chassi desenvolvido para o protótipo. Por meio de análises por elementos finitos, avaliou-se o de-sempenho da estrutura principal e dos elementos de travamento, verificando sua conformidade com os requisitos de resistência e rigidez. Os resultados indicaram que o chassi, fabricado em aço SAE 1020, apresentou desempenho acima do exigido pelas normas, com rigidez à flexão aproximada-mente 44% superior ao valor mínimo estipulado.

4.1 Resultados do cálculo estrutural

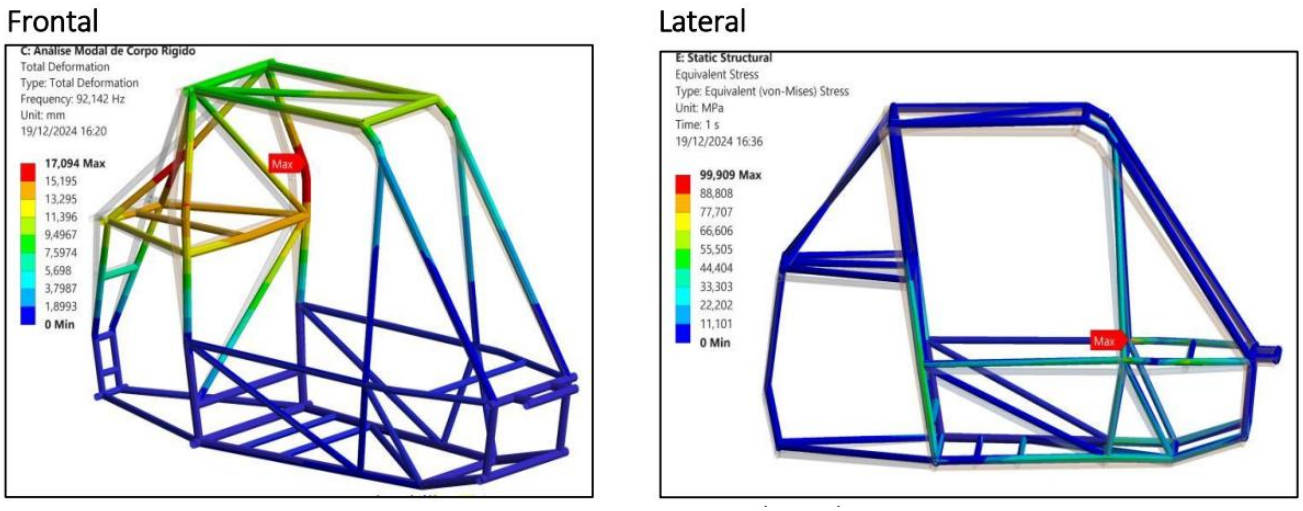
As simulações estruturais realizadas confirmaram que o chassi, fabricado em aço SAE 1020, atende com folga os requisitos de resistência e rigidez. A estrutura principal utilizou tubulações com diâmetro externo de 31,75 mm e espessura de 1,6 mm, enquanto os elementos de travamento foram construídos com tubos de 25,4 mm por 1,5 mm. Essa configuração resultou em uma rigidez à flexão aproximadamente 44% superior ao mínimo exigido pelas normas técnicas aplicadas ao projeto.

FIGURA 5: Arquitetura Interna do Sistema Eletrônico



Foram avaliados quatro cenários principais de carregamento: impacto frontal, impacto lateral, todos com tempo de impacto de 0,2 s e massa aplicada de 250 kg. As forças normalizadas aplicadas foram de 5500 N (frontal), 1700 N (lateral). Em todas as simulações, os níveis de tensão permaneceram abaixo do limite de escoamento do aço SAE 1020, que é de aproximadamente 350 MPa, não sendo identificadas regiões com risco de deformação plástica.

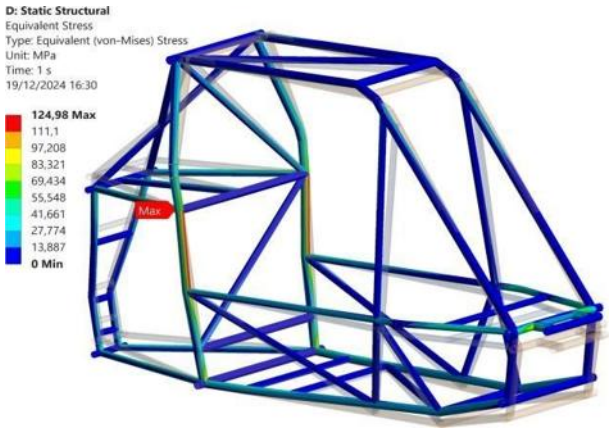
FIGURAS 6: Impacto frontal e lateral: Análise de Tensão do Chassi.



Fonte: Autor (2025)

As análises modais indicaram que as frequências naturais da estrutura, mesmo com a massa adicional do piloto (60 kg) e do sistema de tração acoplado, se mantiveram fora das faixas de excitação do motor e da suspensão, garantindo ausência de ressonância durante o funcionamento do veículo.

FIGURA 7: Análise Modal do Chassi

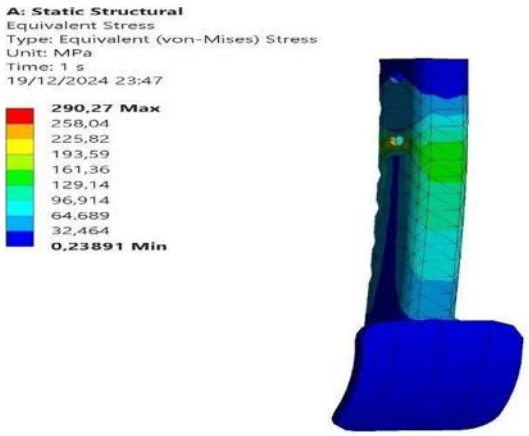


Fonte: Autor (2025)

Para a caixa de redução, utilizou-se o software SimSolid, que aplicou o método das aproximações externas para analisar o conjunto sem necessidade de simplificações geométricas. A caixa, com peso total de 23 kg (sendo 13 kg da carcaça), foi projetada para suportar torques de até 584 N·m com uma relação de transmissão de 8:1. Os resultados das simulações demonstraram que os deslocamentos máximos e tensões nos componentes internos e na carcaça mantiveram-se dentro dos limites

admissíveis, validando sua aplicação em condições severas de tração e impacto típicas das provas da BAJA SAE.

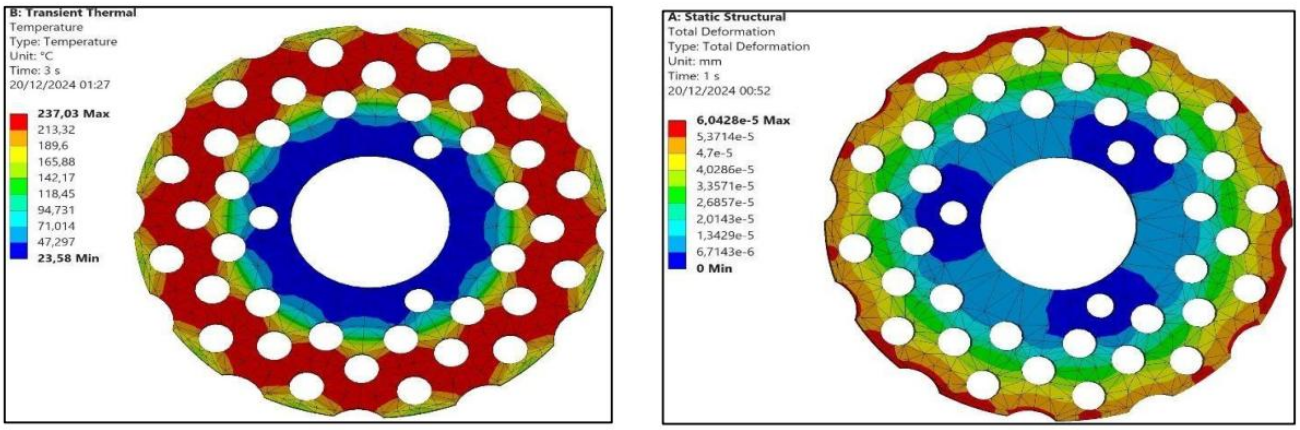
FIGURA 8: Análise de Tensão Equivalente.



Fonte: Autor (2025)

Os discos de freio, confeccionados em aço carbono 1045, foram submetidos a análises de tensão e térmicas. As simulações térmicas transientes, realizadas no ANSYS, permitiram estimar a dissipação de calor durante frenagens prolongadas, considerando furos de alívio e ventilação no disco dianteiro (190 mm) e traseiro (150 mm). A avaliação estrutural demonstrou que, mesmo sob carga térmica e força de frenagem de até 6384 N aplicada pelas pastilhas, os discos mantêm integridade, sem ultrapassar os limites de tensão admissíveis do material.

FIGURAS 9: Análise Térmica do Disco de Freio.



Fonte: Autor (2025)

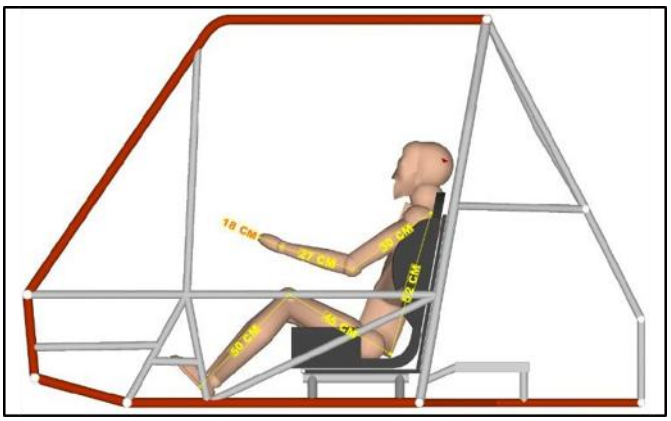
Esses resultados atestam que o projeto estrutural do veículo oferece confiabilidade, resistência e segurança operacional para enfrentar os desafios mecânicos impostos pela competição.

4.2 Desing e ergonomia

A análise ergonômica do banco revelou que a ausência de uma curvatura lombar adaptada pode causar concentração de carga na região inferior da coluna vertebral. Esse achado está alinhado com Zenk et al. (2012), que demonstraram que a falta de suporte adequado nessa área eleva a pressão intervertebral, aumentando o risco de desconforto e lesões musculoesqueléticas. Tal condição pode resultar em fadiga postural e redução do desempenho do piloto em operações prolongadas.

No que tange aos membros superiores, a distância ombro-volante foi avaliada considerando um comprimento total do braço de 57 cm (30 cm do braço + 27 cm do antebraço), o que resulta em um ângulo de flexão aproximado de 110°. Esse valor está dentro do intervalo recomendado para postura funcional, que varia de 90° a 120°, segundo normas internacionais de biomecânica postural, favorecendo o conforto durante o manuseio do volante.

FIGURAS 10: Avaliação antropométrica



Por outro lado, a altura do volante, posicionada em 700 mm, situa-se ligeiramente abaixo do eixo natural dos ombros, estimado em 800 mm. Essa diferença pode causar elevação dos ombros, fator conhecido por induzir tensões musculares e desconforto em tarefas de longa duração, con-forme evidenciado em estudos ergonômicos aplicados a ambientes industriais e veículos (Karwowski, 2006).

TABELA 11. Análise antropométrico pelo método RULA

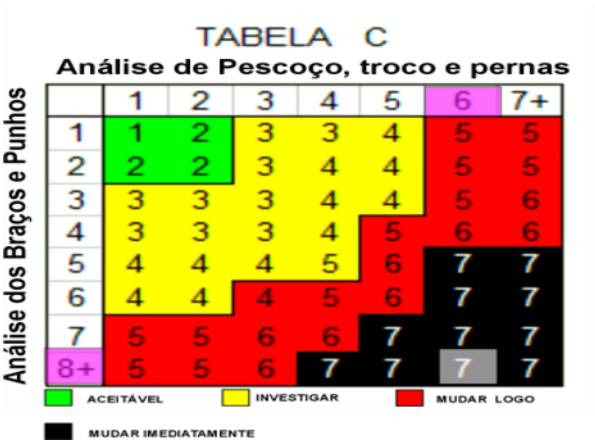
Item Avaliado	Pontuação RULA	Nível de Risco	Recomendação
Postura do Tronco	4	Médio	Ajustes no encosto do assento
Posição dos Braços	*5*	Alto	Reposicionar volante
Ângulo do Punho	3	Baixo	Manter vigilância
Postura do Pescoço	4	Médio	Avaliar ajuste do suporte

Posição dos Joelhos	3	Baixo	Avaliar conforto do assento
Acionamento dos Pedais	5	Alto	Melhorar distância e altura

Fonte: Autor (2025)

A aplicação do método RULA (Tabela 5) evidenciou riscos ergonômicos significativos associa-dos à postura dos membros superiores e à interação com os comandos (volante e pedais). Essa ava-liação quantitativa reforça a necessidade de intervenções ergonômicas focadas no ajuste da geome-tria do assento e na disposição dos controles, visando a melhoria da postura e a redução das sobre-cargas musculoesqueléticas.

TABELA 11. Tabela C resultante do método RULA



Fonte: Checklist RULA

Os resultados da avaliação ergonômica realizados pelo método RULA (Tabela 5) indicaram níveis médios a altos de risco postural, especialmente relacionados ao posicionamento dos braços e ao acionamento dos pedais, sinalizando a necessidade de ajustes projetuais para melhorar o conforto e reduzir sobrecargas musculoesqueléticas. Dessa forma, apesar de algumas dimensões encontra-rem-se dentro dos parâmetros ergonômicos recomendados, os dados obtidos indicam que ajustes pontuais são essenciais para otimizar o conforto, a segurança e a eficiência operacional do piloto durante o uso contínuo.

5 CONCLUSÕES

O projeto apresentado reflete um desenvolvimento integrado e altamente técnico de um veículo off-road competitivo, destacando a aplicação de metodologias avançadas e ferramentas mo-dernas em

todas as etapas do processo. A utilização de softwares como SOLIDWORKS, ADAMS CAR e ANSYS permitiu análises detalhadas e precisas para o design estrutural, dinâmico e de resistência. Os subsistemas foram projetados com foco na eficiência e na robustez, desde a eletrônica embarcada, que proporciona telemetria em tempo real com o microcontrolador ESP32 e protocolos de comunicação como CAN e LoRa, até a transmissão composta por motor Honda GX390, CVT e uma caixa de redução projetada sob rigorosos critérios de desempenho. No subsistema Powertrain, con-cluiu-se que o sistema é capaz de superar os esforços nos dois cenários com margem de segurança, e os eixos projetados em aço 4340 suportam as tensões de torção e flexão dentro dos limites aceitá-veis, inclusive em análises de fadiga. Os materiais selecionados são compatíveis com uso severo e tratamento térmico, garantindo resistência adequada para aplicações no Baja SAE.

O sistema de freios demonstra cuidado com a segurança e a confiabilidade, utilizando discos de aço carbono 1045 e uma configuração que maximiza a eficiência e atende às normas de competi-ção. Já o chassi, projetado em aço SAE 1020, combina leveza e resistência estrutural, assegurando a integridade do veículo e o conforto do piloto, com base em princípios ergonômicos e antropométricos.

Em Design e Ergonomia, observou-se que a ausência de curvatura adaptada pode gerar concentração de carga na parte inferior da coluna, conforme discutido por Zenk et al. (2012). Recomenda-se a adição de um módulo de espuma moldada para a região lombar e uma inclinação progressiva no encosto, além de ajustes na altura ou inclinação do volante em 3 a 5 cm para acomodar diferentes biótipos.

Além disso, a modularidade e expansibilidade do sistema eletrônico abrem caminho para futuras implementações, como sensores GPS e sistemas de inteligência artificial, elevando o potencial estratégico e de desempenho do veículo. Com uma abordagem que alia inovação tecnológica, rigor técnico e normas de segurança, este veículo está bem posicionado para enfrentar os desafios das competições e abrir caminho para avanços ainda mais significativos em projetos futuros.

REFERÊNCIAS

Applied Ergonomics, v. 34, p. 177–184, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ERGONOMIA. ERGBR 1002: Código de Deontologia do Ergonomista Certificado. Ouro Preto: ABERGO, 2003.

CERRA, Aline Lamon; MAIA, Jonas Lucio. Desenvolvimento de produtos no contexto das cadeias de suprimentos do setor automobilístico. Revista de Administração Contemporânea, Curitiba, v. 12,

https://www.scielo.br/j/rac/a/KzstC73WdK7kHVcmGD5sCTp/?lang=pt. Acesso em: 2 ago. 2025. IIDA, I. Ergonomia: projeto e produção. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

Karwowski, W. (2006). International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors. CRC Press.
KOLICH, M. Automobile seat comfort: occupant preferences vs. anthropometric accommodation.
KUORINKA, I. et al. Standardized Nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms. Applied Ergonomics, v. 18, p. 233-237, 1987.

LIMPERT, Rudolf. Brake design and safety. SAE internatio- nal, 2011. n. 1, p. 155-176, jan./mar. 2008. Disponível em: Zenk, J. et al. (2012). Effects of lumbar support on spinal posture and muscle activation. Applied Ergonomics, 43(4), 749-757.

ZENK, R. et al. Spine loading in automotive seating. Applied Ergonomics, v. 43, n. 2, p. 290-295, 2012.

ZITKUS, E. et al. Ergonomia no BAJA: Análise do Desconforto Percebido. Anais do CONAERG, 2016.

Capítulo 14

10.37423/260911397

AS TENDÊNCIAS E DISSONÂNCIAS DA INDÚSTRIA 4.0 NO S&OP DA MANUFATURA ADITIVA DE METAIS: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E PANORAMA CIENTÍFICO (2014-2025)

Ana Carolina Melega Duarte de Oliveira — *Faculdade de Ciências Aplicadas - Universidade Estadual de Campinas*

Antonio Carlos Pacagnella Junior — *Universidade de São Paulo*

Paulo Sérgio de Arruda Ignácio — *Faculdade de Ciências Aplicadas - Universidade Estadual de Campinas*

Rodrigo José Contieri — *Faculdade de Ciências Aplicadas - Universidade Estadual de Campinas*

RESUMO

Objetivos: Este estudo conduziu uma análise bibliométrica (2014-2025) para identificar tendências e dissonâncias da Indústria 4.0 no Planejamento de Vendas e Operações (S&OP) da Manufatura Aditiva de Metais (MAM), investigando a evolução das pesquisas, principais contribuidores e áreas temáticas emergentes. **Originalidade:** O artigo possui uma abordagem de intersecção de domínios do conhecimento que ainda não são amplamente estudados na literatura atual. Se distingue por investigar sistematicamente um campo de pesquisa emergente e crucial para a manufatura moderna, apontando lacunas e oportunidades para estudos futuros. **Método de Pesquisa:** Realizou-se uma análise bibliométrica quantitativa de 796 artigos científicos das bases Web of Science (WoS) e Scopus (2014-2025). A metodologia envolveu análise de conteúdo e estatística descritiva com R, RStudio e Bibliometrix. As palavras-chae utilizadas foram, “industry 4.0”, “additive metal manufacturing” “sales and operations planning” e “s&op”. **Principais Resultados:** A produção científica sobre o tema demonstrou estabilidade até 2020, seguida por um aumento expressivo a partir de 2022, com pico em 2024, e uma alta taxa de colaboração internacional (26,51%). Periódicos como "Sustainability" e “Journal of Clear Production” são proeminentes. Os países, EUA e China lideram publicações, com o Brasil entre os cinco países mais produtivos. Termos como "management" e "performance" são os mais recorrentes. Já as palavras-chave, "additive manufacturing" e "microstructure" foram identificados como Temas Motrizes, enquanto "management", "performance" e "impact" são Temas Emergentes ou em Declínio. Das tendências emergentes, incluem-se a aplicação de "artificial intelligence" e "big data” como elementos chave da correlação temática. **Implicações na teoria e prática:** O estudo ressalta a Indústria 4.0 como impulsionadora da informatização e flexibilidade na manufatura, com a MAM sendo inerente a essa transformação. A integração de tecnologias I4.0 (IoT, IA) no S&OP é determinante para a maior precisão e responsividade, especialmente em peças complexas e em ambientes dinâmicos. Para a práticas, propõem-se que as organizações invistam na integração estratégica de vendas, em processos robustos e uma cadeia de suprimentos adaptada para capitalizar e maximizar os benefícios da MA.

Palavras-chave: Industry 4.0. Innovation. Additive Metal Manufacturing (MAM). Sales and Operations Planning (S&OP). Production Planning. Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A era contemporânea da manufatura é caracterizada pela ascensão da Indústria 4.0, um estágio que marca o início de uma nova era de tecnologia industrial digital (Dobrzánski et al., 2020; Dobrzánski et al., 2020). Este paradigma é impulsionado por avanços exponenciais em tecnologias de ponta, como Sistemas Ciber-Físicos (CPS), Internet das Coisas (IoT), Big Data, Inteligência Artificial (IA), computação em nuvem, simulação, automação industrial e cibersegurança (Dobrzánski et al., 2020; Dobrzánski et al., 2020; Nascimento et al., 2019; lqbal et al., 2020; Sajjad et al., 2022). A Indústria 4.0 visa a informatização abrangente da manufatura, buscando a personalização em massa de produtos, maior flexibilidade e sustentabilidade nos processos produtivos (lqbal et al., 2020; Sajjad et al., 2022). Embora a visão inicial da Indústria 4.0 tenha se concentrado fortemente nos sistemas ciber-físicos e no suporte de TI para a manufatura, os autores defendem um modelo holístico aumentado que abrange também materiais, processos e máquinas tecnológicas, além do seu desenvolvimento (Dobrzánski et al., 2020; Dobrzánski et al., 2020).

Nesse cenário, a Manufatura Aditiva (MA), incluindo a Manufatura Aditiva de Metais (MAM), emerge como uma área tecnológica crucial na plataforma do modelo holístico aumentado da Indústria 4.0 (Dobrzánski et al., 2020; Dobrzánski et al., 2020; Dobrzánski et al., 2020). A MA é definida como o processo de produção de objetos a partir de um modelo tridimensional (3D) pela união de materiais, camada por camada, diretamente de matérias-primas em pó, líquido, folha ou filamento, sem a necessidade de moldes ou ferramentas (Nascimento et al., 2019; lqbal et al., 2020). O desenvolvimento da manufatura na fase da Indústria 4.0 é, de fato, predominantemente dependente do avanço da engenharia de materiais (Dobrzánski et al., 2020; Dobrzánski et al., 2020).

Em relação as tecnologias aditivas e híbridas para a fabricação de produtos, a utilização de pós de metais, suas ligas e cerâmicas, são consideradas tecnologias avançadas de produção digital (ADP) (Dobrzánski et al., 2020). Essas tecnologias demonstram alto potencial e atratividade, com substanciais oportunidades de desenvolvimento (Dobrzánski et al., 2020; Dobrzánski et al., 2020). É importante ressaltar que a MA, é inerentemente ligada à Indústria 4.0, devido à necessidade significativa de Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) e da Inovação Digital (ID) (Dobrzánski et al., 2020). Suas aplicações se estendem por diversas indústrias, como aviação, energia, automotiva e, notavelmente, na área médica, para implantes cirúrgicos e aplicações odontológicas, das quais em sua grande maioria são consideradas de alta complexidade (Dobrzánski et al., 2020).

Além disso, a MA se destaca pela sua capacidade de criar geometrias complexas, incluindo canais internos que seriam difíceis de se obter por métodos convencionais (Dobrzánski et al., 2020). Embora a MA apresente alta agilidade e seja fortemente orientada ao cliente, ela ainda requer melhorias em termos de velocidade de produção e sustentabilidade (Iqbal et al., 2020). No entanto, ela é conhecida por economizar material, apesar do alto consumo de energia. Um exemplo é a amálgama sustentável da manufatura aditiva e subtrativa, especialmente em configurações "done-in-one", que é capaz de reter os traços favoráveis de ambas as tecnologias, aproximando-as dos requisitos da Indústria 4.0 (Iqbal et al., 2020). Tais processos híbridos podem resultar em reduções significativas no tempo de ciclo, custo operacional e custo unitário, como forma de melhoria continua.

Paralelamente, o Planejamento de Vendas e Operações (S&OP) é um processo interdisciplinar prevalente no nível de planejamento tático, com os principais propósitos de equilibrar a oferta e a demanda e construir pontes entre os planos estratégicos e operacionais de uma organização (Nicolas et al., 2021; Seeling et al, 2019; Romão et al., 2021). O S&OP tradicionalmente se baseia em previsões e dados históricos, sendo eficaz em ambientes estáveis (Kalla et al, 2025). Contudo, a crescente pressão por adaptações no S&OP é impulsionada por mudanças significativas e inesperadas no ambiente de negócios, como pandemias, conflitos geopolíticos e catástrofes naturais (Kalla et al, 2025). Neste contexto dinâmico e complexo, a integração das tecnologias da Indústria 4.0 é crucial para aprimorar o S&OP. A literatura recente enfatiza a necessidade de uma visão holística e integrada que considere as pessoas, os processos e as tecnologias da informação (TI) para um design e execução eficazes do S&OP (Kalla et al, 2025).

A relevância da adoção de tecnologias da Indústria 4.0 no S&OP para a Manufatura Aditiva de Metais (MAM) reside na sinergia entre esses domínios. A Indústria 4.0, com suas capacidades de conectividade (IoT, WAN), análise de grandes volumes de dados (Big Data Analytics), e inteligência artificial (IA), fornece as ferramentas necessárias para que o S&OP se torne mais preciso, robusto e responsive (Nascimento et al., 2019; Dobrzánski et al., 2020; Dobrzánski et al., 2020; Dobrzánski et al., 2020; Kalla et al, 2025; Dobrzánski, 2023; Iqbal et al., 2020).

Pode-se citar como exemplo, sistemas baseados em IoT que coletam dados em tempo real do chão de fábrica da MAM, fornecendo informações cruciais para o planejamento e a tomada de decisões no S&OP (Sajjad et al., 2022; Kalla et al, 2025). A extensão da MAM, associada a Indústria 4.0, pode ser classificada como Manufatura Aditiva Inteligente (MAI), e esta possui o potencial de melhorar a

flexibilidade operacional em até 55%, e a Manufatura Híbrida Aditiva & Subtrativa Inteligente em até 65%, conforme demonstrado por modelos de medição de flexibilidade operacional sendo que, essa melhoria na flexibilidade é um dos objetivos centrais da Indústria 4.0 (Sajjad et al., 2022).

Outra intersecção a se destacar, é a integração do S&OP com a Gestão de Riscos da Cadeia de Suprimentos (SCRM), que traz uma direção promissora para a próxima geração do S&OP, especialmente em ambientes incertos (Kalla et al, 2025). A evolução do conceito para "S&OP 4.0", propõe alavancar tecnologias da Indústria 4.0, como blockchain e IA generativa, para aumentar a confiabilidade e a robustez do S&OP, possibilitando tomadas de decisão mais rápidas e precisas em cadeias de suprimentos dinâmicas e complexas (Kalla et al, 2025). Esta aplicação de enquadra na complexidade das peças fabricadas por MAM, como restaurações protéticas dentárias, que podem ter milhões de triângulos representando formas orgânicas, exige a precisão e o controle oferecidos pelas tecnologias digitais da Indústria 4.0 e um S&OP aprimorado (Dobrzánski, 2023).

Portanto, o viés deste estudo, se demonstra pela convergência dessas áreas a fim de otimizar o planejamento e a execução na manufatura moderna, garantindo que as organizações possam atender às demandas de um mercado cada vez mais competitivo e personalizado, de forma sustentável e inovativo. Diante deste contexto, evidenciou-se a oportunidade de investigar as interrelações entre Indústria 4.0, Planejamento de Vendas e Operações (S&OP), Manufatura Aditiva de Metais (MAM) e suas extensões práticas, em busca de comprender as correlações entre eles e direcionar para um conjunto de melhores práticas e tendências que criem convergências entre elas.

1.1 Problemas de Pesquisa

Este artigo se propõe a analisar as tendências, dissonâncias os conceitos e o panorama científico mais recentes sobre as interrelações entre Indústria 4.0, Planejamento de Vendas e Operações (S&OP), Manufatura Aditiva de Metais (MAM), buscando responder às seguintes questões de pesquisa:

Q1: Como têm evoluído as pesquisas sobre a adoção da Indústria 4.0 no planejamento de vendas e operações (S&OP) da manufatura aditiva de metais (MAM) ao longo do tempo?

Q2: Quais são os principais contribuintes (como periódicos, autores e países) para a literatura sobre a Indústria 4.0 no planejamento de vendas e operações (S&OP) da manufatura aditiva de metais (MAM) ao longo do tempo?

Q3: Quais são as principais áreas temáticas emergentes na literatura científica sobre a adoção da Indústria 4.0 no planejamento de vendas e operações (S&OP) da manufatura aditiva de metais (MAM)?

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é realizar uma bibliometria no período de 2014 a 2025, para identificar as tendências e dissonâncias relacionadas ao tema proposto. Desta forma, foi possível encontrar afirmações e conteúdos que permitiram concluir o objetivo proposto. Para isto, o estudo se divide em três etapas de desenvolvimento:

1) Realizar a análise bibliométrica do período de 2014 a 2025 por meio das palavras-chave “INDUSTRY 4.0”, “SALES AND OPERATIONS PLANNING – S&OP” e “METAL ADDITIVE MANUFACTURING”.

2) Mapear o volume da evolução cronológica da temática, os principais contribuintes (periódicos internacionais, autores e países de influência).

3) Analisar e discutir a coorelação dos termos emergentes, identificando potenciais tendências e dissonâncias em relação a temática deste estudo.

1.3 Delimitação do conteúdo

Este estudo delimita-se em relação aos critérios determinados pelos autores para a realização de uma análise bibliométrica. Conforme subscrito, a análise foi realizada pelo período de 2014 a 2025, por meio das palavras-chave “INDUSTRY 4.0”, “SALES AND OPERATIONS PLANNING – S&OP” e “METAL ADDITIVE MANUFACTURING” e utilizou-se da análise de conteúdo por meio da linguagem R, via software RStudio e do pacote Bibliometrix.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção visa apresentar a base teórica deste estudo, com conceitos fundamentais para a compreensão da intersecção entre Indústria 4.0, a Manufatura Aditiva (MA), a Manufatura Aditiva de Metais (MAM) e o Planejamento de Vendas e Operações (S&OP), que moldam o cenário da manufatura moderna.

2.1 A Indústria 4.0: Transformação na Manufatura

A Indústria 4.0 representa a Quarta Revolução Industrial, uma transformação significativa que impulsiona a manufatura do domínio mecânico para a era da Manufatura Inteligente (MI) (Niharika et al., 2022; Sharma et al., 2021; Iqbal et al., 2020). Teve seu início em 2011 na Alemanha e foca na integração e computadorização abrangente dos processos de manufatura (Iqbal et al., 2020). Diferentemente das revoluções anteriores, a Indústria 4.0 é caracterizada pela fusão de domínios físicos e digitais em tempo real, permitindo que os elementos organizacionais tomem decisões de forma autônoma (Sharma et al., 2021; Niharika et al., 2022). Os principais pilares e habilitadores tecnológicos da Indústria 4.0 incluem:

- Sistemas Ciber-Físicos (CPS): Permitem a integração de processos computacionais e físicos, onde computadores e redes controlam processos físicos em tempo real (Iqbal et al., 2020; Niharika et al., 2022; Sharma et al., 2021; Sajjad et al., 2022 …)

- Internet das Coisas (IoT): Habilita a interoperabilidade e a conectividade em tempo real entre diversos processos e departamentos, coletando dados através de sensores e atuadores (Niharika et al., 2022; Iqbal et al., 2020; Sharma et al., 202; Sajjad et al., 2022; Nascimento et al., 2019). Temos também a Internet industrial das Coisas (IIoT) que é um conceito chave para o contexto industrial na adoção da IoT (Nakagawa et al., 2021).

- Biga Data e Análise de Dados (BA): Se refere a capacidade de processar grandes volumes de dados de forma rápida e confiável para as tomas de decisão baseadas em dados (Niharika et al., 2022; Iqbal et al., 2020; Sajjad et al., 2022; Nascimento et al., 2019; Sajjad et al., 2022; Sharma et al., 2021; Nicolas et al., 2021).

- Computação em Nuvem (Cloud Computing): Tecnologia essencial para armazenamento e processamento de grandes volumes de dados (Niharika et al., 2022; Iqbal et al., 2020; Sajjad et al., 2022; Nascimento et al., 2019).

- Manufatura Aditiva (MA): Uma das tecnologias transformadoras que permite flexibilidade e personalização em massa (Niharika et al., 2022; Iqbal et al., 2020; Sajjad et al., 2022; Nascimento et al., 2019).

- Robôs Avançados e Inteligência Artificial (IA): Proporcionam soluções diferenciadas para problemas de manufatura, melhorando a eficiência e produtividade (Niharika et al., 2022; Iqbal et al., 2020; Sajjad et al., 2022; Nascimento et al., 2019).

Em sua essência, a Indústria 4.0 visa a informatização da manufatura, com o objetivo de viabilizar a customização em massa de produtos. Também é caracterizada por uma integração entre os domínios ciber e físico, resultando em sistemas de produção inteligentes que podem tomar suas próprias decisões, a depender do ambiente de aplicação. Ela busca melhorias massivas em produtividade, sustentabilidade, agilidade e centralidade no cliente no nível do processo, e exige avanços na detecção de dados, conectividade e automação. Contudo, a sua implementação apresenta desafios como a necessidade de novas competências, os custos de implementação e a padronização (Sharma et al., 2021; Nascimento et al., 2019; Iqbal et al., 2020; Nakagawa et al., 2021). Neste sentido, modelos de arquitetura de referência, como IIRA (Industrial Internet Reference Architecture) e RAMI 4.0 (Reference Architectural Model Industrie 4.0), são desenvolvidos para guiar a implementação da Indústria 4.0, fornecendo uma visão genérica e componentes determinantes para as fábricas inteligentes (Nakagawa et al., 2021).

Apesar de seu foco no suporte de TI e sistemas ciber-físicos para a manufatura, outras pesquisas propõem um modelo holístico e estendido da Indústria 4.0, que também considera o desenvolvimento de materiais de engenharia, processos de fabricação de produtos e máquinas tecnológicas (Nascimento et al., 2019; Dobrzánski et al., 2020; Dobrzánski et al., 2020; Dobrzánski et al., 2020; Kalla et al, 2025; Dobrzánski, 2023; Iqbal et al., 2020), possuindo forte associação a ela devido à necessidade de intenso envolvimento de tecnologias de informação e comunicação (TIC) (Dobrzánski et al., 2020).

2.2 A Manufatura Aditiva (MA) e Manufatura Aditiva de Metais (MAM): Tecnologias Habilitadoras

A Manufatura Aditiva (MA), comumente conhecida como impressão 3D, é um processo de produção de objetos tridimensionais que consiste em unir materiais camada por camada, diretamente a partir de matérias-primas em pó, líquido, folha ou filamento, sem a necessidade de moldes ou ferramentas a partir de um modelo digital (Niharika et al., 2022; Iqbal et al., 2020; Dobrzánski et al., 2020). É considerada um dos principais habilitadores tecnológicos da Indústria 4.0 (Niharika et al., 2022; Iqbal et al., 2020; Sajjad et al., 2022; Nascimento et al., 2019).

Além da MA ser reconhecida como uma das próximas grandes revoluções tecnológicas, as principais vantagens da MA incluem a capacidade de superar desafios da manufatura tradicional, a liberdade de design para criar geometrias complexas e leves, a produção de peças com alto nível de personalização e a conservação de material (embora possa ser intensiva em energia) (Niharika et al., 2022; Nascimento et al., 2019; lqbal et al., 2020; lqbal et al., 2020).

O seu desenvolvimento é aplicado em diversas setores industriais, incluindo aviação, energia, automotivo, suprimentos medicos (especialmente em implantes cirúrgicos e aplicações odontológicas), indústria de ferramentas e produção de bens e consumo. Para isto, uma das categorias de processos da MA, mais comuns para metais é a Fusão em Leito de Pó (PBF) (lqbal et al., 2020; Dogea et al.; 2022). Esta especialização decorre da Manufatura Aditiva de Metais (MAM), da qual centra-se no uso de pós de metal, ligas metálicas e em materiais cerâmicos (lqbal et al., 2020; Dobrzánski et al., 2020; Dobrzánski et al., 2020). Dos processos que são amplamente utilizados e aplicados no segmentos industriais supracitados, podem-se destacar a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), Fusão em Leito de Pó a Laser (LPBF/SLM), Fusão por Feixe de Elétrons (EBM) e Sinterização Direta a Laser de Metal (DMLS) (Sajjad et al., 2022; Dogea et al.; 2022; Dobrzánski et al., 2020; Dobrzánski et al., 2020; Dobrzánski, 2023).

Neste sentido, a MAM é relevante para a fabricação de componentes complexos e, se integrada a Indústria 4.0, ela pode ser otimizada por meio da incorporação de sensors IoT para manutenção preditiva, o uso de inteligência artificial para o controle em tempo real e otimização de processos e de tecnologias híbridas para obter maior precisão, melhor acabamento superficial e economias de materials, tempo e custo (Sajjad et al., 2022; Dogea et al.; 2022; Liu J. et al., 2022; lqbal et al., 2020; Dobrzánski et al., 2020).

2.3 Planejamento de Vendas e Operações (S&OP): Aplicações e Desafios

O Planejamento de Vendas e Operações (S&OP) é um processo de gestão e negócios, que envolve diferentes funções da organização, com o objetivo de realizar um planejamento comum, a médio prazo, a fim de equilibrar a demanda e oferta (Scott et al., 2018). O termo S&OP é relativamente novo, pois surgiu no meio acadêmico por volta do início dos anos 2000, por meio de um estudo prático professional, com o intuito de sincronizar a oferta e demanda de ambos os lados (Scott et al., 2018; Benayiba et al.; 2024).

Geralmente é realizado uma vez ao mês e revisado pela administração para uma determinada família de produtos, e faz o papel intermediário entre o planejamento operacional e o planejamento estratégico (Kreuter et al.; 2021). Para isto, diversos blocos compõem o S&OP: contextualização, entrada, processos, estrutura e saída/resultados (Romão et al., 2021). Estes por sua vez, permitem identificar e compreender o processo de S&OP de forma integral e interna da organização (Romão et al., 2021).

Assim, quando adotado com sucesso, o S&OP possui a perspectiva de melhorar o desempenho do negócios, aumentar os lucros e otimizar os resultados da cadeia de suprimentos, a níveis de serviço, precisão da previsão de demanda, gestão de estoque e ativos (Seeling et al., 2019; Seeling et al.; 2021; Kalla et al., 2025). Na literatura, tal sucesso é predicado pelo desenvolvimento cíclico de cinco etapas (Boorman, 2013; Pedroso et al. 2016; Benayiba et al., 2025), que envolvem um conjunto de atividades para produzir um planejamento harmonioso (Stahl, 2010). Estas cinco estapas são as seguintes:

Etapa 1 - Desenvolver uma previsão de demanda irrestrita: usualmente realizada pelo departamentos de vendas, envolve a reunião dos dados de vendas para uma base de previsão inicial. A projeção da previsão se concentra nas necessidades do cliente, independente das restrições e viabilidades da produção, e tendo como saída um planejamento baseado apenas em previsões de demanda.

Etapa 2 – Desenvolver um plano incial de fornecimento: as equipes da cadeia de suprimentos e operações coletam os dados sobre as restrições de produção, que não foram analisados na etapa anterior. São consideradas dados da capacidade interna, como gestão estratégica de inventário, fabricação, logística e capacidade dos fornecedores. Estes dados são combinados ao plano anterior e possui a previsão de atendimento e restrição da demanda.

Etapa 3 – Desenvolver um consenso final do planejamento operacional: as equipes de vendas, marketing, operações e finanças se reunem para definer o consenso do planejamento de demanda e oferta, definindo outras diretrizes para o próxima ciclo. São consideradas nesta previsão, as consequências da decisão, Riscos e oportunidades.

Eapa 4 – Comunicação e Implementação do planejamento: todas as equipes envolvidas no S&OP, realizam o comunicado oficial via publicação do planejamento final e as diretrizes para a implementação em todas as funções comprometidas.

Etapa 5 – Medir o desempenho do processo planejado: esta última etapa de planejamento do S&OP, se refere ao controle da eficácia na implementação do planejamento final, por meio de Indicadores chave de desempenho, como os KPIs.

Ou seja, observa-se que a complexidade se encontra na fase de implementação (execução) do S&OP, uma vez que se faz necessária a integração de várias funções e áreas concomitantes. Apesar dos benefícios, a sua atuação eficiente ainda é um desafio para as organizações. Estes desafios, considerados como barreiras, são identificados em: falta de compreensão completa dos processos que envolvem a implementação do S&OP, (Romão et al., 2021; Seeling et al., 2021), problemas com a comunicação, resolução de conflitos e coordenação (Stentoft et al., 2020; Benayiba et al., 2025), falta de maturidade das organizações para adotar o S&OP (Pedroso et al. 2017) e falta de treinamento adequado para os membros das equipes (Terry et al.; 2014).

É importante destacar que, outros desafios também se fazem presentes, devido ao ambiente dinâmico e complexo dos negócios. Estes são carcterizados pelas mudanças bruscas e significativas, que desafiam a integração dos processos tradicionais do S&OP, exigindo a sua adaptação mediante a atualidade.

3 MÉTODO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

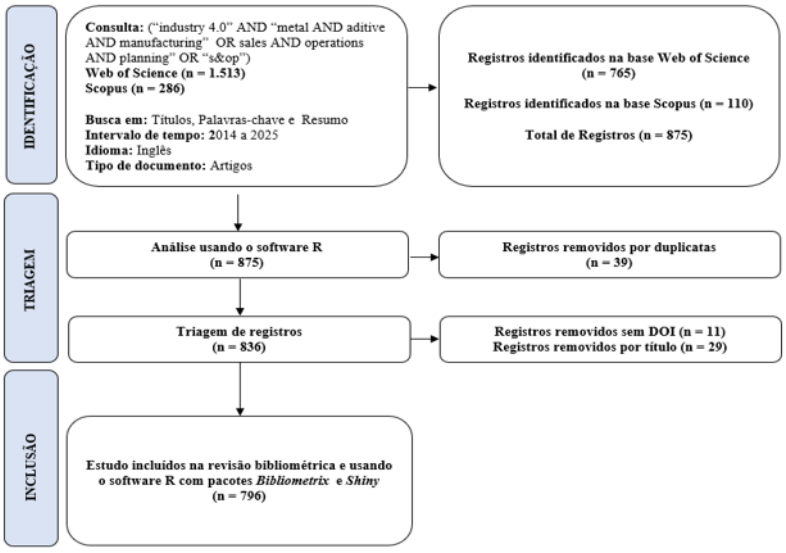
A proposta metodológica deste trabalho se baseia em uma pesquisa de análise bibliométrica, da qual sua metologia é de natureza quantitativa. Essa abordagem permite identificar os autores, instituições, periódicos, países, redes de colaboração, áreas de pesquisa e palavras-chave mais citadas. Quanto aos objetivos, este trabalho possui caráter descritivo e exploratório, a fim de descrever um determinado conjunto de dados bibliométricos e identificar novas tendências, dissonâncias e lacunas de pesquisa em um campo does conhecimento.

Em consonância, a bibliometria é uma técnica quantitativa e estatística de medição dos índices de produção, com a apresentação de exemplos de indicadores bibliométricos, obtidos por meio do número de artigos publicados para a disseminação do conhecimento científico de determinada área da ciência (Miguel, 2018; Ruas & Pereira, 2014).

Neste sentido, este artigo apresenta um estudo bibliométrico sobre a intersecção da indústria 4.0 e o planejamento de vendas e operações (S&OP) na manufatuta aditiva de materiais, analisando

publicações das bases Web of Science e Scopus a fim de identificar a evolução, colaborações e tendência na área de pesquisa. Forma incluídos artigos publicados entre os anos de 2014 a 2025, focados em indústria 4.0 no planejamento de vendas e operações e manufatura aditiva de materiais. A análise foi conduzida utilizando ferramentas de análise de conteúdo e estatística descritiva. A Figura 1 apresenta o fluxo resumido da metodologia aplicada composta de três etapas. Sendo a primeira etapa (identificação) de artigos científicos publicados no período de 2014 e 2025, no idioma em inglês, com palavras-chave “INDUSTRY 4.0” and “METAL and ADDITIVE and MANUFACTURING” or “SALES and OPERANTION and PLANNING” or “S&OP”, nas respectivas bases de dados mencionadas anteriormente. A Segunda etapa (análise) consiste na seleção e exclusão dos artigos duplicados, sem o Digital Object Identifier (DOI), com título for a do escopo requerido no estudo. E por fim, na Terceira etapa, foram selecionados 796 artigos que atendem a construção da relevância do tema desta produção científica.

Figura 1 – Fluxograma da metedologia de pesquisa.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

A partir dos dados encontrados, de acordo com o Fluxograma da metodologia de pesquisa (Figura 1), iniciou-se a análise bibliométrica. Este método é indicado para mapear a arquitetura intelectual da literatura por ser quantitativo, sistemático e replicável. Para a realização do processo de mapeamento, foram adotados os seguintes passos: selecionados artigos de journals, resultando inicialmente em 1799 artigos potencialemente relevantes. Sendo 1.513 da WoC e 286 da Scopus. Na sequência, realizou-se a discriminação, em ambas as bases de dados por: período de 2014 à 2025 (1.030 da WoC e 263 da Scopus); publicações de artigos (776 da WoC e 126 da Scopus) e artigos somente em inglês (765 da WoC e 110 da Scopus). Destes resultando em um total parcial de 875 artigos relevantes.

Em seguida, utilizando-se da análise de conteúdo por meio da linguagem R e do pacote Bibliometrix, que permitiu o mapeamento científico, extração de dados das bases WoS e SCP, foram removidas 39 duplicatas, 11 artigos que não continham DOI e a exclusão de 29 artigos por título que não estavam alinhados com a temática da pesquisa., garantindo eficiência e consistênca na análise bibliométrica. Após a elegibilidade do conteúdo da amostra final de 796 artigos, foi utilizado o programa R onde os dados foram explorados visual e interativamente através da ferramenta Biblioshiny que é uma aplicação do pacote Bibliometrix e proporciona uma interface gráfica intuitiva para análises bibliométricas sem necessidade de programação avançada.

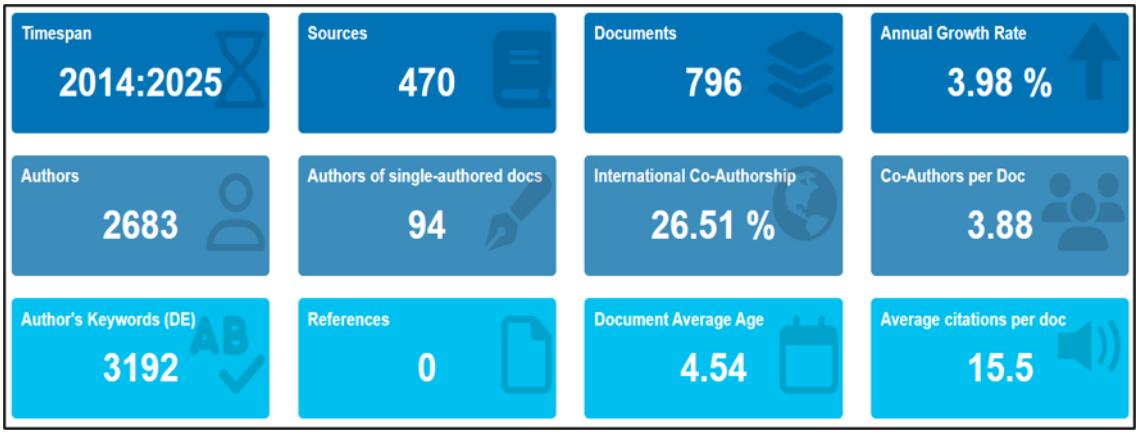
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para a exploração do resultados, estabeleceram-se critérios para a pesquisa e padronização de dados bibliométricos dos quais foram analisados sequencialmente a evolução cronológica de publicações por ano, produção científica anual, principais contribuidores, fontes mais relevantes, rede de colaboração de autores, autores com maior número de publicações e citações, rede de palavras-chave, mapa de ocorrências de palavras-chave e tendências da pesquisa sobre a intersecção da indústria 4.0 e o planejamento de vendas e operações (S&OP) na manufatuta aditiva de metais (MAM).

4.1 Resumo dos dados e Publicações por ano

Para responder à QP1, apresenta-se a progressão das pesquisas sobre a Indústria 4.0 e o S&OP na Manufatura Aditiva de Metais (MAM), entre 2014 e 2025, com base na análise de 796 artigos. O resumo das principais informações da base de dados utilizada, são identificadas na Figura 2.

Figura 2 – Resumo da progressão dos dados

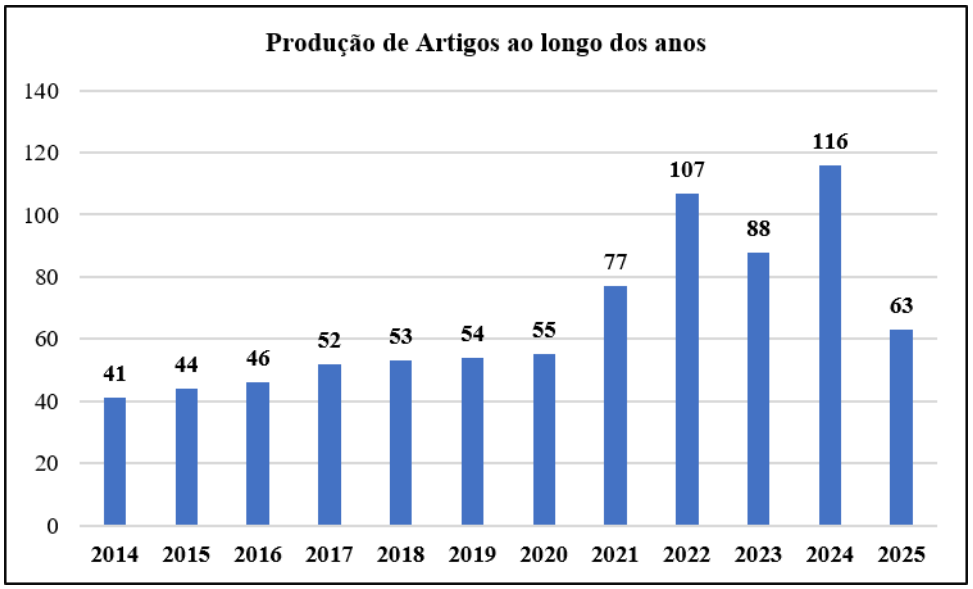


Fonte: Bibliometrix (2025)

A análise revela uma média de 3,88 autores por documento, indicando bom nível de colaboração entre pesquisadores no campo da Indústria 4.0 e o S&OP na MAM. Destaca-se também que 26,51% das publicações envolvem coautorias internacionais, evidenciando a crescente internacionalização e o compartilhamento de experiências entre diferentes os contextos. Esses dados reforçam a relevância e a complexidade do tema, além de apontarem para a formação de redes de pesquisa globais.

Já em relação a evolução temporal, de acordo com o período definido entre 2014 e 2015, o número de artigos publicados por ano é apresentada na Figura 3. É possível observar que o início do número de publicações sobre o tema se dá no ano de 2014 com uma estabilidade (constância similar no número de publicações) até 2020. A partir de 2022, evidencia-se um maior volume e havendo em 2024, um aumento expressivo com relação aos anos anteriores. Percebe-se a estabilidade tanto nos anos anteriores quanto posteriores em relação ao número de publicações. É importante ressaltar que, a diminuição no ano de 2025 se deu em função da amostra ser realizada antes do término do período.

Figura 3 – Número de publicações de artigos entre 2014 e 2025



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

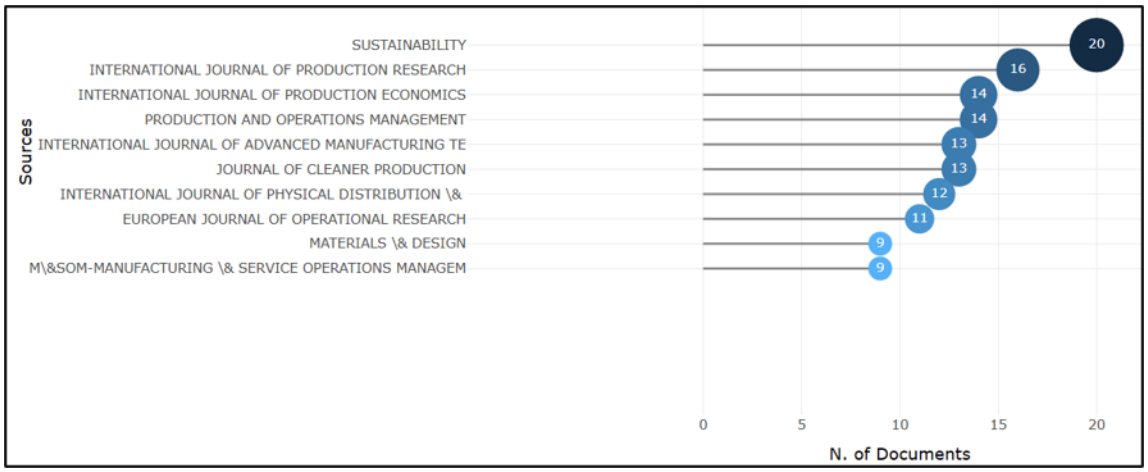
4.2 Principais contribuidores

Esta seção responde à QP2, destacando os principais periódicos, países e autores que investigam o tema estudado. Como critério de análise, foram selecionados os dez principais contribuidores para revelar os países em que ocorrem as pesquisas mais influentes a cerca do tema estudado.

4.2.1 Fontes mais relevantes

A Figura 4 destaca os periódicos mais relevantes, evidenciando sua importância na discussão de métodos decisórios aplicados à gestão e inovação em sistemas de produção/manufatura de metais. Publicações concentradas em periódicos de sustentabilidade, produção, gestão de serviços e operações e manufatura evidenciam a interdisciplinaridade do campo, integrando aspectos técnicos, estratégicos e ambientais.

Figura 4 – Fontes relevantes



Fonte: Bibliometrix (2025)

Observa-se que o periódico com mais destaque acerca da Indústria 4.0 no S&OP de MAM, é o "Sustainability" indicando forte correlação com estudos que envolvam a sustentabilidade neste tipo de planejamento de serviço e produção. Esse panorama contribui para a identificação das principais plataformas de divulgação científica na área, servindo como guia para pesquisadores que buscam tanto referências bibliográficas consolidadas quanto potenciais periódicos para submissão de novas pesquisas.

Faz-se importante destacar que esses periódicos registram as práticas mais atuais, promovem avanços teóricos e metodológicos e contribuem significativamente para o desenvolvimento do campo do tema de estudo. A fim de corroborar para a signifância dos periódicos em destaque, a Tabela 1 apresenta o fator de impacto o Journal Citation Reports (JCR) de cada um deles, reafirmando a relevância deste estudo com o tema proposto.

Tabela 1 – Fator de impacto dos periódicos relevantes

Periódico	***JCR***
Sustainability	3,3
International Journal of Production Research	7,3
Production and Operations Management	5,1
International Journal of Advanced Manufacturing Techonology	3,1
Journal of Cleaner Production	10
International Journal of Physical Distribuition & Logistics Management	7,3

European Journal of Operational Research	6.0
Materials & Desing	7.9
M&SOM-Manufacturing & Service Operations Managament	4,2

Dos oito periódicos mais relevantes, podem-se destacar os cinco com os maiores fatores de impacto que são, Journal of Cleaner Production, International Journal of Physical Distribuition & Logistics Management, Materials & Desing e International Journal of Production Research. Estes indicadores promovem o alto nível de qualidade e credibilidade dos estudos publicados em cada um dos papers, demonstrando grande impacto dos temas sobre Indústria 4.0 no S&OP da MAM na produção acadêmica global. Ainda sobre estes, a Tabela 2 apresenta a produção científica anual de três principais periódicos de grande impacto.

Tabela 2 – Produção científica anual dos periódicos relevantes

Ano	*Sustainability*	*International Journal of Advanced Manufacturing Techonology*	*Journal of Cleaner Production*
2014	1	0	1
2015	1	0	1
2016	2	0	2
2017	3	0	2
2018	3	0	4
2019	4	1	4
2020	4	3	4
2021	6	3	6
2022	12	7	7
2023	14	8	10
2024	20	13	13
2025	20	13	13

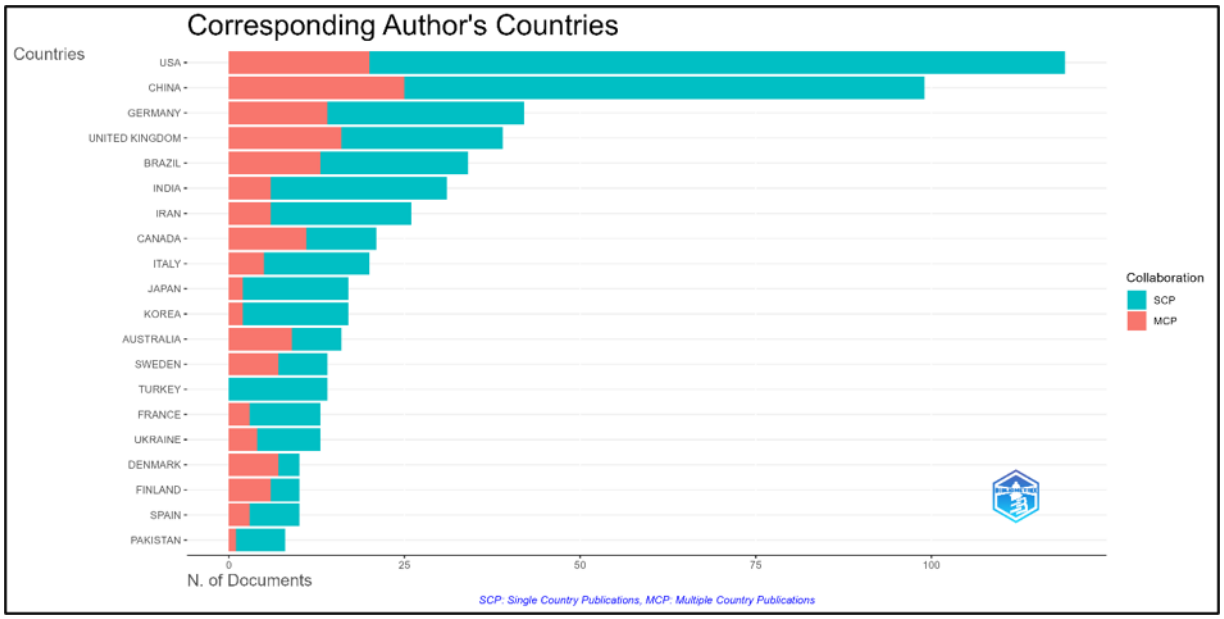
Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Observa-se o crescente interesse, do período de 2014 e 2025, de pesquisadores internacionais na publicação de cada uma delas, especialmente dos anos de 2022 até o presente momento. Tais informações reforçam a tendência positiva da ascensão de pesquisas internacionais em relação ao estudo proposto neste trabalho. Em números, pode-se destacar que o periódico “Sustainability” possui gradativo aumento de produções por ano a partir de 2022, de 12 para 20 artigos publicados anualmente.

4.2.2 Rede de colaboração dos autores relevantes

A Figura 5 apresenta os países de origem dos autores com maior número de publicações relacionadas à temática, diferenciando entre colaborações internacionais (MCP – Multiple Country Publications) e nacionais (SCP – Single Country Publications). Os Estados Unidos da América (EUA), lidera o ranking com o maior número de documentos publicados, evidenciando sua forte atuação na área, predominantemente por meio de publicações nacionais (SCP). Esse padrão se repete em países como China, Alemanha e Reino Unido, que ocupam as posições seguintes. A alta proporção de SCP nesses países sugere que boa parte da produção científica é desenvolvida por grupos de pesquisa internos, o que pode indicar forte capacidade local de desenvolvimento científico na área.

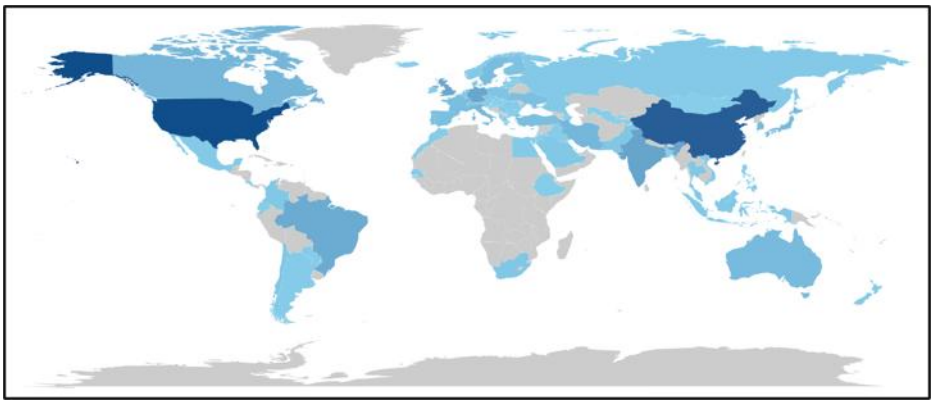
Figura 5 – Países dos autores com maiores publicações



Fonte: Bibliometrix (2025)

Destaca-se ainda a presença do Brasil entre os cinco países mais produtivos, o que demonstra sua inserção ativa no debate científico internacional, ainda que com menor volume de publicações em comparação com os líderes do ranking. Esses dados podem indicar não apenas a distribuição geográfica da pesquisa em Indústria 4.0 no S&OP de MAM, mas também a tendência de cada país em trabalhar individualmente ou em colaboração com outros. Esses países demonstram um compromisso com o avanço do conhecimento e práticas em inovação do planejamento de operações, serviços e produção na manufatura aditiva de metais globalmente. Tal relevância também é demonstrada na Figura 6, dos quais os países com maior número de publicações nacionais (SCP) do tema deste estudo, estão representadas respectivamente, pelas cores em azul de tonalidade marinho e royal.

Figura 6 – Produção científica pelos países



Fonte: Bibliometrix (2025)

Os países identificados pela cor azul de tonalidade marinho, são os EUA com a frequência de 427 publicações, seguido da China com 368. Já os países identificados pela tonalidade royal, destacam-se a Índia com a frequência de 129 publicações, Alemanha com 125, Reino Unido com 123 e por fim o Brasil com 108. Estes dados reforçam a importância do desenvolvimento de novas pesquisas do tema deste estudo, incluindo a participação de grande potências econômicas mundiais. Em relação as publicações da temática de colaboração internacional (MCP), a Tabela 3 apresenta o ranking dos países que publicaram em cooperação e o número da produção científica.

Tabela 3 – Mapa mundial da colaboração entre os países

Ranking	De	Para	Quantidade
1º	EUA	China	15
2º	China	Reino Unido	8
3º	EUA	Canadá	8
4º	Suécia	Finlândia	7
5º	EUA	Reino Unido	7
6º	Alemanha	Brasil	6
7º	Brasil	Portugal	5
8º	Canadá	França	5
9º	China	Canadá	5
10º	China	Singapura	5
11º	Dinamarca	Noruega	5
12º	Reino Unido	Candá	5
13º	EUA	Austrália	5
14º	China	Austrália	4

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

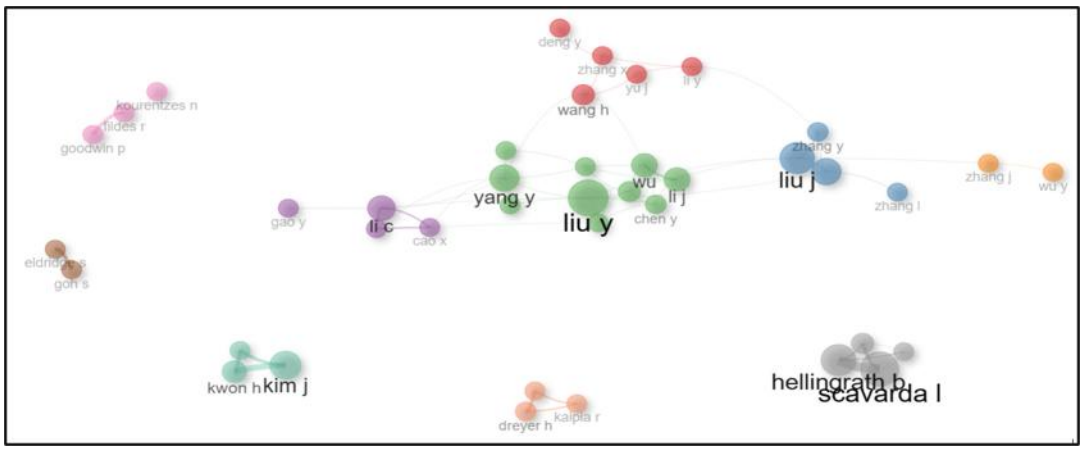
De acordo com a análise da colaboração mundial de publicações da temática, percebe-se a predonimância do EUA e da China como países autorais e mandatários em relação aos demais. O Brasil, número sete do ranking mundial, possui os dois tipos de participações, tanto como país autoral, quanto

nação colaboradora, com a Alemanha e Portugal. Destaca-se também que a maior quantidade de publicações em colaboração é entre O EUA e a China. Estes dados indicam o domínio de apenas dois países em frente ao investimento, desenvolvimento e publicações de pesquisas científicas sobre o tema deste estudo. Isto oportuniza uma maior investigação de outras nações, incluindo de paises emergentes, como Singapura.

4.2.3 Autores relevantes

Conforme subscrito em seções anteriores, outros critérios de análise bibliométrica foram adotados para melhor compreensão do fenômeno. Em sequência, com o auxílio do pacote Bibliometrix, foi possível demostrar a correlação entre os artigos estudados e seus autores, por meio da construção de uma rede de colaboração e cocitação, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Rede de colaboração e cocitação dos autores relevantes

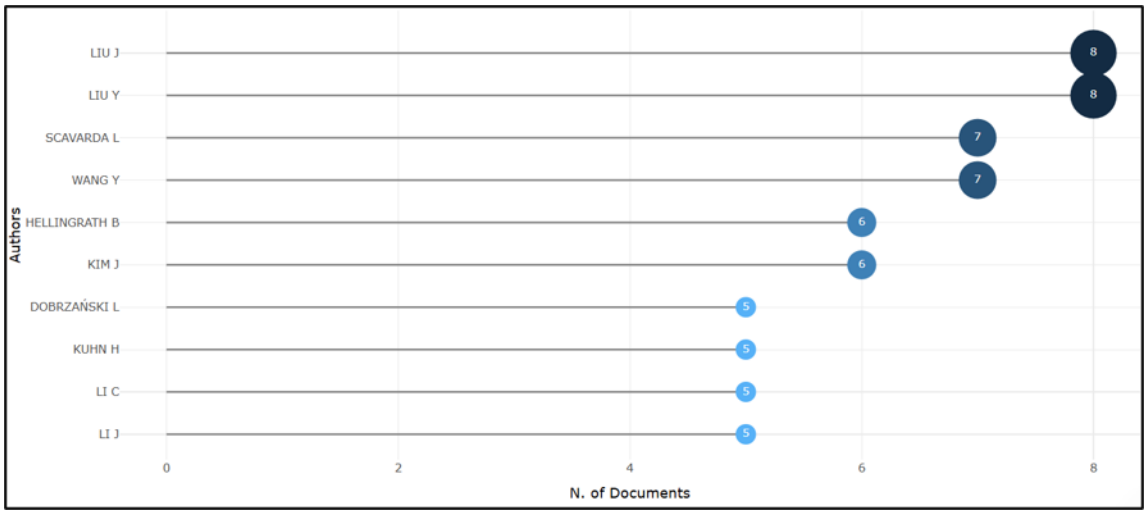


Fonte: Bibliometrix (2025)

Observa-se a formação de dez clusters sobre a colaboração realizada entre autores relevantes. Dentre as principais participações, estão os clusters destacados sequencialmente nas cores (1) verde, (2) azul, (3) roxo, (4) vermelho e (5) laranja, que se encontram no centro e na parte superior da rede de cocitação. Percebe-se que todos os dezoito autores, que compõem estes cinco clusters elementares, são de origem asiática especificamente da China. Já os demais clusters das cores, (6) cinza, (7) verde claro, (8) laranja escuro, (9) rosa e (10) marrom, não possuem correlação entre si e também não contribuem para a rede de colaboração e cocitação dos autores mais relevantes.

A fim de complementar a análise, também foi possível identificar o ranking dos dez autores (Top 10) contribuintes de maior relevância para a temática deste estudo. Estes são apresentados na Figura 8, indicando o número de documentos publicados, cujos possuem mais de quatro publicações.

Figura 8 – Autores relevantes e suas publicacões



Fonte: Bibliometrix (2025)

Inicialmente, destacam-se os autores Liu L. e Liu Y. com oito publicações cada e na sequência Scavarda L. e Wang Y, com sete publicações, dos quais têm maior visibilidade de documentos e estudos sobre os temas relacionados desta pesquisas. A mesma característica, citada anteriormente sobre a origem geográfica dos autores, pode ser aplicada nestes resultados. Ou seja, a maioria dos autores relvantes são da China, enquanto o Scavarda L. é do Brasil, Hellingrath B. da Alemanha e Dobrznaki L. da Polônia.

4.3 Desenvolvimento temático

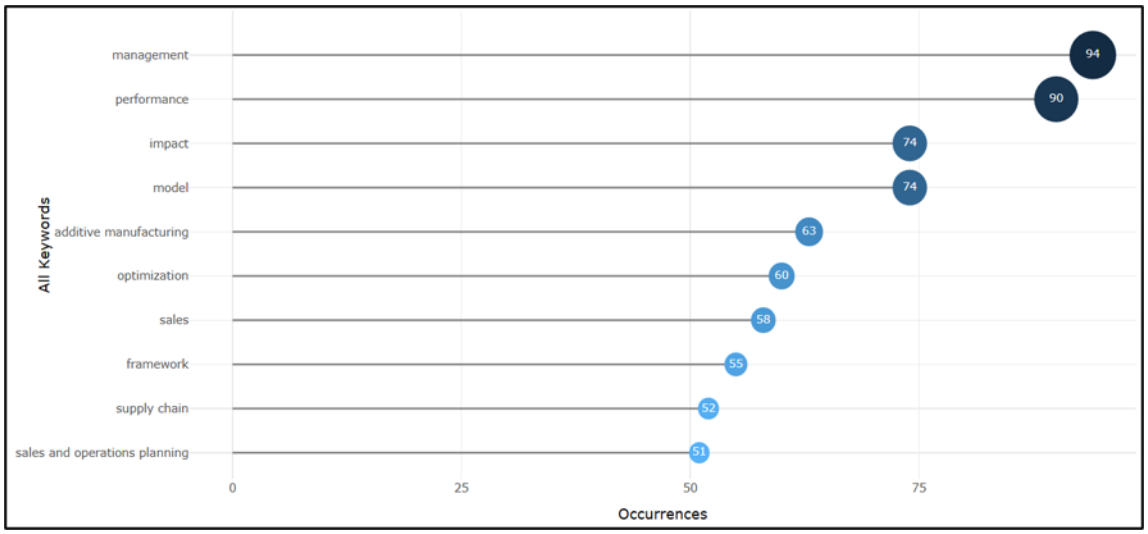
Esta seção visa responder à QP3, explorando as áreas temáticas identificadas no estudo bibliométrico pelo ranking das palavras-chave, nuvem de palavras-chave, mapa de árvore, rede de coocorrência e por fim o mapa temático das plavaras-che de autores.

4.3.1 Palavras-chave

A Figura 9 apresenta o ranking das palavras-chave mais recorrentes utilizadas pelos autores em publicações relacionadas à temática de Indústria 4.0 no S&OP de MAM A análise desses termos permite compreender as tendências temáticas e os enfoques metodológicos predominantes na área. Os termos “management” e “performance” lideram com o maior número de ocorrências, destacando-

se como o eixo central das investigações, respectivamente com 94 e 90 ocorrências. Estes dados indicam, que as pesquisas na área temática deste estudo, se ampliam em investigações que tenham correlação com técnicas e ferramentas de gestão e performance.

Figura 9 – Palavras-chave dos autores



Fonte: Bibliometrix (2025)

Em seguida, aparecem os termos “impact” e “model”, com 74 ocorrências cada, evidenciando o interesse contínuo da comunidade científica pelo uso de métodos estratégicos para apoiar a inovação nas áreas de vendas, operações, produção, finanças e supply chain de indústrias. No entanto, o quarto termo mais citado “additive manufacturing”, que se trata do objeto deste estudo, resulta em 63 ocorrências. Isto demonstra que a manufatura aditiva está sendo mais estudado pelos pesquisadores em busca de maior eficiência no seu planejamento estratégico, tomada de deicsão, equilíbrio entre a previsão da oferta e demanda e no aperfeiçoamento do nível de serviço ao cliente.

Termos como “sales”, “framework”, “supply chain” e “sales and operations planning” também se sobressaem, com menor ocorrência. Isso aponta para uma abordagem que busca desenvolver um modelo de integração entre operações, vendas e cadeia de suprimentos. Ou seja, diante a complexidade industrial da manufatura aditiva (MA), Aaintegração coesa e estratégica das vendas, de um framework de processos robusto, de uma cadeia de suprimentos adaptada e de um S&OP dinâmico, se torna indispensável para que as organizações possam capitalizar plenamente os benefícios da MA, transformando seus desafios em vantagens competitivas sustentáveis.

Em suma, a análise das palavras-chave evidencia um campo dinâmico, com forte ênfase em gerenciamento, performance, impacto, modelo e manufatura aditiva, demonstrando um esforço da

academia em desenvolver abordagens mais robustas, adaptáveis e alinhadas aos desafios contemporâneos na adoção da indústria 4.0 no planejamento de operações e vendas da manufatura aditiva. Outras palavras-chave são apresentadas pela nuvem de palavras (Figura 10) que corroboram para a análise dos resultados subscritos.

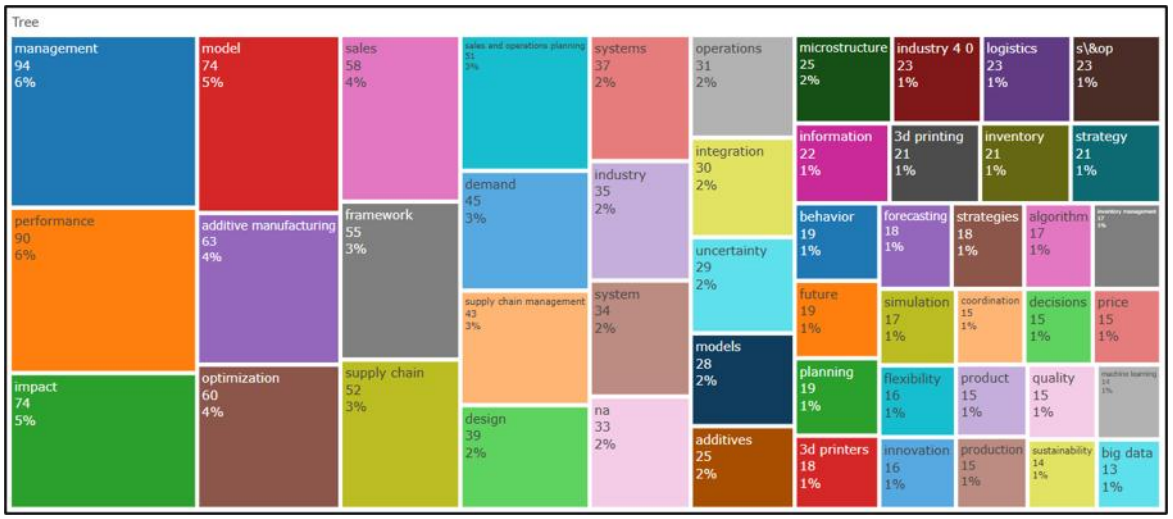
Figura 10 – Nuvem de palavras-chave dos autores



Fonte: Bibliometrix (2025)

Quanto maior a fonte da palavra, maior a ocorrência na amostra dos artigos analisados. Percebe-se a forte presença dos termos “management”, “performance”, “impact”, “additive manufacturing”, “framework”, “sales”, “framework”, “sales and operations planning”, “optimization”, “supply chain management” e “demand”, que contribuem para a importância da temática proposta neste estudo. Outras palavras-chave que possuem menor ocorrência, mas se fazem pertinentes a esta área do conhecimento são: “industry 4.0”, “3D printing”, “sustainability”. O grau de significância para a ocorrência de cada um destes termos pode ser verificado no mapa de árvore, por meio da Figura 11.

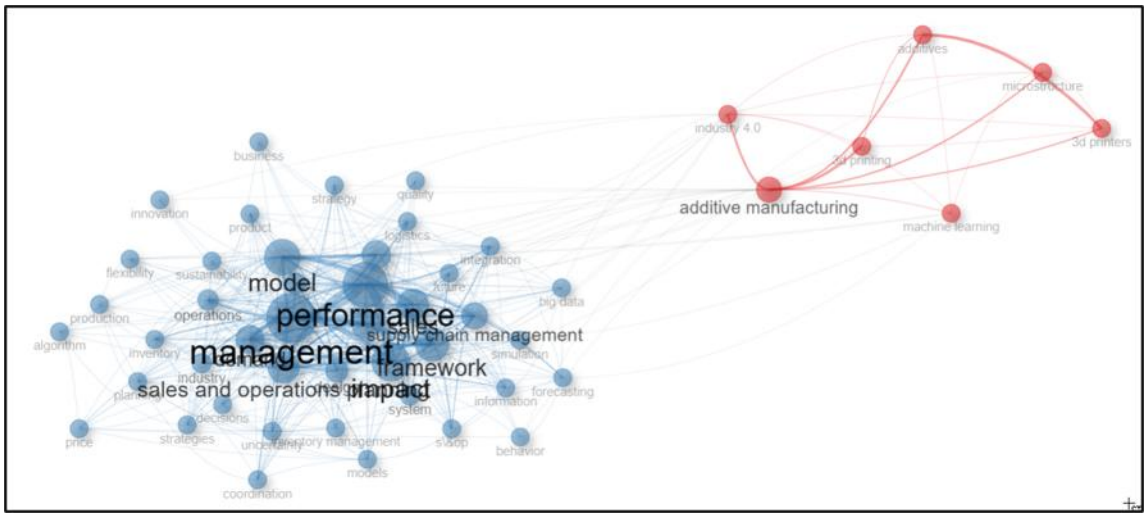
Figura 11 – Mapa de Árvore



Fonte: Bibliometrix (2025)

Além da investigação sobre a quantidade de ocorrências de cada palavra-chave, o mapa de árvore também apresenta a porcentagem unitária em relação ao total da amostra de artigos utilizados para fins desta análise bibliométrica. Destacam-se, respectivamente, as quantidades e porcentagens das ocorrências das palavras-chave que são objetos deste estudo: “management” (94 – 6%), “performance” (90 – 6%), “impact” (74 – 5%), “model” (74 – 5%), “additive manufacturing” (63 – 4%), “framework” (55 – 3%), “sales and operations planning” (31 – 3%), “s&op” (23 – 1%), industry 4.0” (23 – 1%), “3D printing” (21 – 1%),”innovation” (16 – 1%), “big data” (13 – 1%) . Sobre a correlação dos termos, a Figura 12, demonstra baixa intersecção da nuvem de palavras-chave mais citadas (à esquerda) com as que não possuem citações diretas (à direita) com a amostra estudada. Estes resultados explicam que os termos “management”, “performance”, “impact”, “model”, “framework” e “sales and operations planning” estão sendo mais estudados na área de gerenciamento de produção e da cadeia de suprimentos.

Figura 12 – Rede de Coocorrência



Fonte: Bibliometrix (2025)

Já os outros termos que também estão diretamente ligados ao tema desta pesquisa, como “additive manufacturing” e “industry 4.0” aparecem coorelacionados, a direita com estudos na área de inovação e tecnologia. Isso demonstra que os três termos, em conjunto, ainda não são muito estudados na literatura atual, tendo a necessidade de se propôr maiores investigações.

4.3.2 Análise temática

O mapa temático de palavras-chave revela as tendências de pesquisa, lacunas de conhecimento e oportunidades para estudos futuros, sendo organizado em quatro quadrantes que refletem diferentes estágios de desenvolvimento temático. Este por sua vez é amplamente utilizado em estudos bibliométricos, organiza os temas de pesquisa em quatro quadrantes com base em duas métricas principais: centralidade, que indica a relevância de um tema em relação aos demais, e densidade, que avalia o grau de desenvolvimento interno do tema (Callon; Courtial; Laville, 1991; Cobo et al., 2011).

Essa abordagem tem sido empregada para compreender a estrutura e a evolução de diferentes áreas do conhecimento. Os quatro quadrantes são descritos a seguir:

• Temas Motrizes (Motor Themes): Alta centralidade e alta densidade. São bem desenvolvidos e fortemente conectados a outros temas, sendo essenciais para a área de estudo.

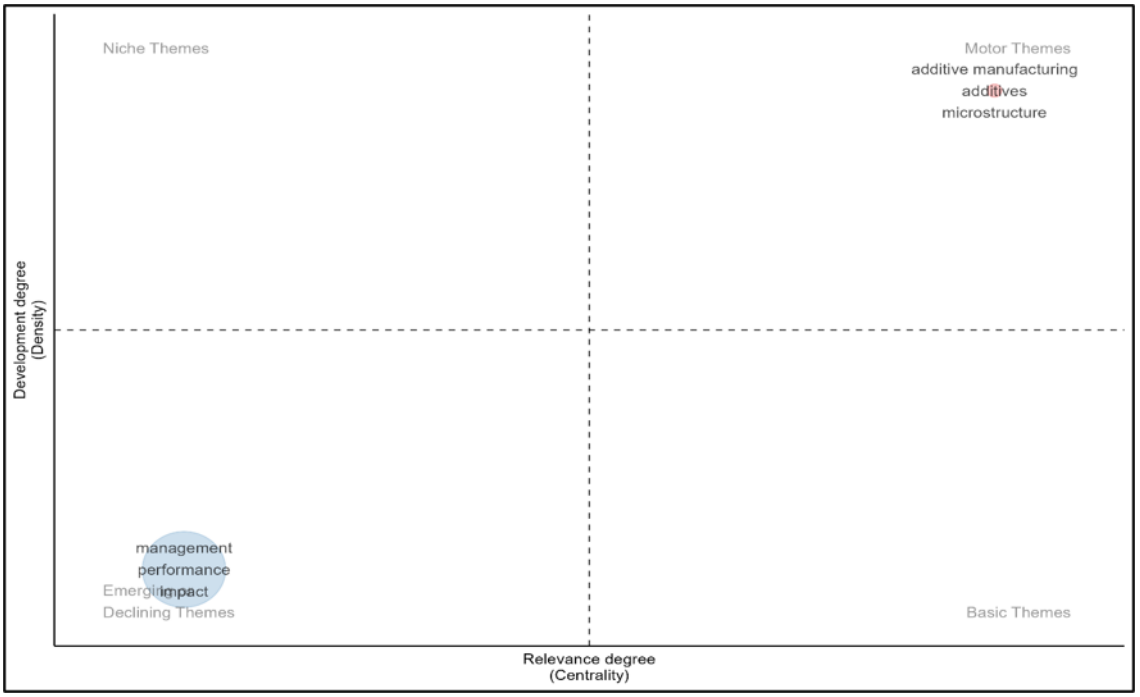
• Temas de Nicho (Niche Themes): Alta densidade e baixa centralidade. Representam tópicos especializados e aprofundados, mas com menor integração ao núcleo do campo científico.

• Temas Emergentes ou em Declínio (Emerging or Declining Themes): Baixa centralidade e baixa densidade. Correspondem a tópicos pouco desenvolvidos e com baixa relevância no momento, podendo estar em ascensão ou declínio.

• Temas Básicos (Basic Themes): Alta centralidade e baixa densidade. São temas amplamente conectados, porém ainda não suficientemente desenvolvidos, servindo como base para investigações futuras.

Neste viés, a Figura 13 apresenta o mapa temático gerado a partir das palavras-chave dos autores, evidenciando a distribuição e o grau de desenvolvimento dos principais tópicos da área.

Figura 13 – Mapa temático das palavras-chave dos autores



Fonte: Bibliometrix (2025)

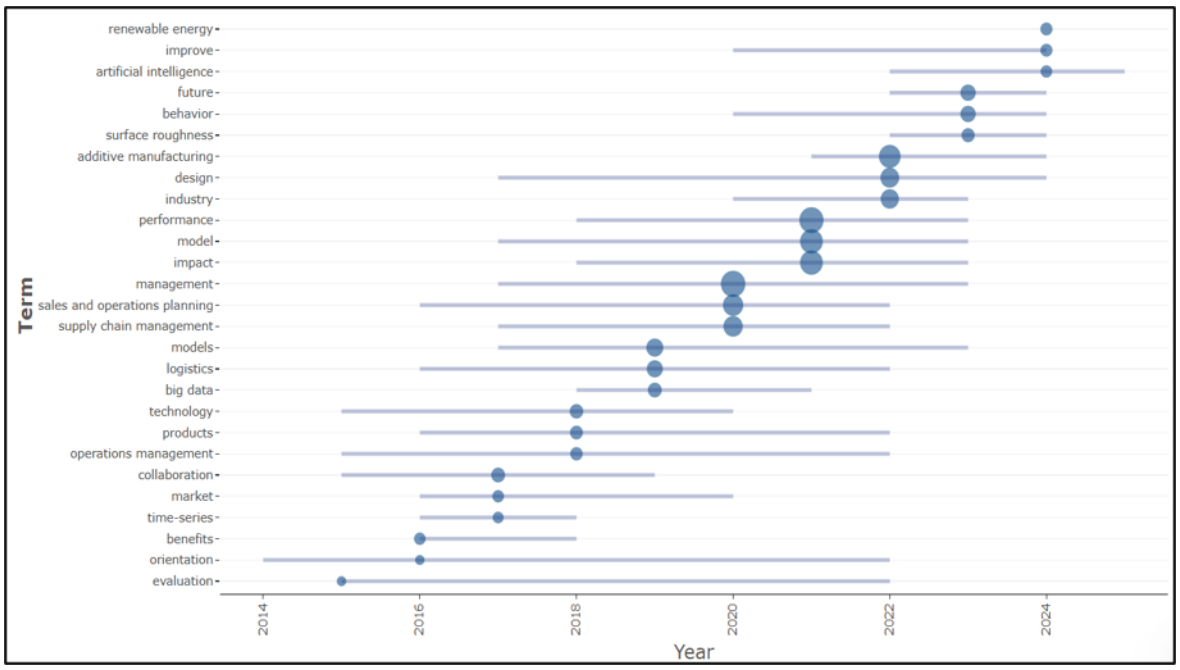
Os quadrantes formados por esses eixos permitem categorizar os temas em quatro grupos. No quadrante superior direito, correspondente aos Temas Motores, encontram-se termos como “ADDITIVE MANUFACTURING”, “ADDITIVES” e “MICROSTRUCTURE’. Esses temas apresentam tanto alta centralidade quanto alta densidade, indicando que são bem desenvolvidos e altamente conectados com outras temáticas da área. Isto indica que estes três termos centrais são os mais estudados pelos acadêmicos e que despertam atenção de futuras pesquisas para melhoria, inovação e sustentabilidade dos processos de manufatura e produção.

No quadrante correspondente aos Temas Emergentes ou em Declínio, encontram-se termos como “MANAGEMENT”, “PERFORMANCE” e “IMPACT’. Essas palavras-chave apresentam tanto baixa centralidade quanto baixa densidade, sendo interpretados como áreas em estágio inicial de desenvolvimento ou que estã perdendo relevância na literatura atual. No entanto, seu posicionamento pode também sinalizar tendências emergentes, especialmente no contexto de ferramentas e técnicas de gestão aplicadas a inovação da manufatura aditiva, sendo oportuna uma discussão mais aprofundada sobre o contexto das tendências identificadas, possivelmente consultando estudos internacionais ou especialistas na área para fornecer uma interpretação mais rica e contextualizada.

E por fim, observa-se a ausência de termos alocados nos quadrantes de Temas Básico, localizado no inferior direito e Temas de Nicho, localizado no superior esquerdo. Neste caso, a análise se torna nula para as palavras-chave que precisam de maior desenvolvimento ou de casos aplicados que não se articulam fortemente com os principais eixos teóricos. Estes dois últimos resultados indicam novas oportunidades de pesquisas para outras áreas do conhecimento que se tornem complementares ao tema central de Indústria 4.0 no S&OP da MAM.

Complementando estes dados, a Figura 14 apresenta as tendências emergentes e os temas recorrentes que têm moldado a discussão acadêmica e professional nesta área, ao longo do período de 2014 e 2025.

Figura 14 – Tópicos de tendências das palavras-chave



Fonte: Bibliometrix (2025)

A análise também evidenciou as tendências nas palavras-chave associadas a adoção da Indústria 4.0 no S&OP da MAM, destacando a crescente aplicação de novas tecnologias e sustentabilidade para a área de planejamento e manufatura, como “renewable energy”, “artificial intelligence”, additive manufacturing” e “big data”. Estas abordagens vêm sendo amplamente discutidas e utilizadas no S&OP e também na manufatura aditiva diante as suas criticidades e complexidades contemporâneas.

Termos como “industry”, “sales and operations planning”, “supply chain management” e “products”, reforçam a busca por inovação e de novas tecnologias tanto para o ambiente industrial como um todo mas também para as áreas de S&OP, cadeia de suprimentos e no desenvolvimento de produtos.

De modo geral, observa-se uma consolidação do uso de inovação e tecnologias da indústria 4.0 como tendência emergente e estratégica para a melhoria do S&OP na manufatura aditiva. Tais tendências visam contribuir para o desenvolvimento de futuros estudos que contemplem a coorleação de elementos inovativos na área temática deste trabalho.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo principal realizar uma análise bibliométrica no período de 2014 a 2025 para identificar as tendências e dissonâncias relacionadas à adoção da Indústria 4.0 no Planejamento de Vendas e Operações (S&OP) da Manufatura Aditiva de Metais (MAM). Para tanto, foram alboradas três questões de pesquisa, que buscaram compreender a evolução das pesquisas, os principais contribuidores e as áreas temáticas emergentes neste campo.

5.1 Principais resultados

A análise dos 796 artigos científicos identificados nas bases Web of Science (WoS) e Scopus revelou um campo de pesquisa em ascensão. A produção científica sobre a intersecção entre Indústria 4.0, S&OP e MAM, demonstrou uma estabilidade de 2014 a 2020, seguida por um aumento expressivo no volume de publicações a partir de 2022, com um pico notável em 2024. Este crescimento reflete o crescente interesse e a relevância do tema na literatura contemporânea, embora o ano de 2025 apresente uma diminuição devido à coleta de dados ter sido realizada antes do término do período. A alta taxa de colaboração, com uma média de 3,88 autores por documento e 26,51% de coautorias internacionais, sublinha a natureza global e colaborativa da pesquisas.

Em relação aos principais contribuidores, observou-se a dominância de periódicos como "Sustainability", "International Journal of Production Research", "Journal of Cleaner Production", e "Materials & Design". O periódico "Sustainability" se destaca, indicando uma forte correlação entre os estudos e a temática da sustentabilidade no S&OP e na produção. Os altos fatores de impacto desses periódicos reforçam a qualidade e credibilidade das pesquisas publicadas na área.

Geograficamente, os Estados Unidos da América (EUA) e a China lideram o ranking de países com o maior número de publicações, majoritariamente por meio de publicações nacionais (SCP – Single Country Publications). O Brasil aparece entre os cinco países mais produtivos, evidenciando sua inserção ativa no debate científico internacional. A colaboração internacional é predominante entre EUA e China, embora o Brasil também participe de cooperações com Alemanha e Portugal. Essa concentração de produção científica em poucos países indica oportunidades para uma maior investigação por parte de outras nações, incluindo economias emergentes. Quanto aos autores, Liu L. e Liu Y. se destacam com o maior número de publicações, e a maioria dos autores relevantes são de origem asiática, embora Scavarda L. (Brasil), Hellingrath B. (Alemanha) e Dobrznaki L. (Polônia) também apareçam entre os mais prolíficos.

A análise temática, baseada nas palavras-chave da temática deste estudo, revelou que "management" e "performance" são os termos mais recorrentes, seguidos por "impact", "model" e "additive manufacturing". Isso indica que as pesquisas se concentram em técnicas e ferramentas de gestão, performance e estratégias para apoiar a inovação nas áreas de vendas, operações, produção, finanças e cadeia de suprimentos. O mapa temático classificou "ADDITIVE MANUFACTURING", "ADDITIVES" e "MICROSTRUCTURE" como Temas Motrizes, sendo bem desenvolvidos e fortemente conectados a outras temáticas da área, o que os torna essenciais para estudos futuros em melhoria, inovação e sustentabilidade. Por outro lado, "MANAGEMENT", "PERFORMANCE" e "IMPACT" foram classificados como Temas Emergentes ou em Declínio, com baixa centralidade e densidade, sugerindo um estágio inicial de desenvolvimento ou perda de relevância, mas também indicando tendências emergentes na aplicação de ferramentas de gestão à inovação da manufatura aditiva. A ausência de Temas Básicos e Temas de Nicho no mapa temático aponta para novas oportunidades de pesquisa em áreas complementares.

As tendências emergentes incluem a crescente aplicação de "renewable energy", "artificial intelligence", "additive manufacturing" e "big data" no planejamento e manufatura. A busca por

inovação e novas tecnologias para o ambiente industrial, S&OP, gestão da cadeia de suprimentos e desenvolvimento de produtos reforça a consolidação da Indústria 4.0 como uma tendência estratégica para aprimorar o S&OP na MAM.

5.2 Implicações para a Teoria e a Prática

Este estudo reforça a importância da Indústria 4.0 como um paradigma que impulsiona a informatização abrangente da manufatura, visando a personalização em massa, maior flexibilidade e sustentabilidade nos processos produtivos. A Manufatura Aditiva (MA), particularmente de metais, a MAM, é uma área tecnológica crucial nesse cenário, inerentemente ligada à Indústria 4.0 pela sua dependência de Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) e Inovação Digital (ID).

A relevância da integração das tecnologias da Indústria 4.0 no S&OP para a MAM, se situa na sinergia que permite que o S&OP se torne mais preciso, robusto e responsivo. Sistemas baseados em IoT, por exemplo, fornecem dados em tempo real do chão de fábrica da MAM, que são cruciais para o planejamento e tomada de decisões no S&OP. A "Manufatura Aditiva Inteligente" (MAI) e a "Manufatura Híbrida Aditiva & Subtrativa Inteligente" demonstram um potencial significativo para melhorar a flexibilidade operacional, indicando que é um objetivo central da Indústria 4.0.

A evolução do S&OP para um "S&OP 4.0", com a alavancagem de tecnologias como blockchain e Inteligência Artificial (IA) generativa, é vista como decisivo para aumentar a confiabilidade e robustez do processo, permitindo tomadas de decisão mais rápidas e precisas em cadeias de suprimentos dinâmicas e complexas. Isso é particularmente relevante para a complexidade das peças fabricadas por MAM, como restaurações protéticas dentárias, que exigem a precisão e o controle oferecidos pelas tecnologias digitais da Indústria 4.0 e um aprimoramento do S&OP.

Para a prática, os resultados indicam a necessidade de investimento pelas organizações na integração coesa e estratégica das vendas, de um framework de processos robusto, de uma cadeia de suprimentos adaptada e de um S&OP dinâmico para capitalizar plenamente os benefícios da MA. A compreensão das palavras-chave mais citadas, como "management", "performance", "impact", e "model", sugere que as empresas devem focar no desenvolvimento de abordagens mais robustas e adaptáveis para gerenciar os desafios contemporâneos da Indústria 4.0 na manufatura aditiva.

5.3 Limitações e Sugestões para Futuras Pesquisas

Uma limitação do estudo está na amostra de 2025, que foi realizada antes do término do período, o que pode ter afetado o volume total de publicações para este ano. A outra implica no método deste trabalho, uma vez que a análise bibliométrica realiza indicadores bibliométricos sem o aprofundamento do conhecimento em todos os estudos amostrais. Em relação as pesquisas futuras, podem-se citar:

- A baixa correlação entre os termos "additive manufacturing", "industry 4.0" e "sales and operations planning" na rede de coocorrência de palavras-chave, sugere que esses três termos, em conjunto, ainda não são amplamente estudados na literatura atual. Isso indica a necessidade de maiores investigações que explorem a sinergia entre esses domínios.

- A ausência de termos alocados nos quadrantes de Temas Básicos e Temas de Nicho no mapa temático representa uma oportunidade significativa. Futuras pesquisas podem se concentrar em aprofundar esses temas, desenvolvendo teorias e casos aplicados que se articulem fortemente com os principais eixos teóricos da Indústria 4.0, S&OP e MAM.

- Dada a predominância de EUA e China nas publicações, há uma oportunidade para investigar o investimento, desenvolvimento e publicações de pesquisas científicas sobre o tema em outras nações, especialmente em países emergentes como Singapura, que demonstram participação no cenário global.

- É oportuno realizar uma discussão mais aprofundada, por meio de uma revisão sistemática da literatura (RSL), sobre os temas emergentes identificados, como "MANAGEMENT", "PERFORMANCE" e "IMPACT", possivelmente consultando estudos internacionais ou especialistas na área para fornecer uma interpretação mais rica e contextualizada sobre o porquê de seu posicionamento como temas emergentes ou em declínio.

- Estudos futuros podem focar na criação de modelos e frameworks de integração que considerem as pessoas, os processos e as tecnologias da informação (TI) para um design e execução eficazes do S&OP no contexto da Indústria 4.0 e MAM, conforme enfatizado pela literatura.

Em suma, este estudo forneceu um panorama científicoimportante sobre as tendências e dissonâncias da Indústria 4.0 no S&OP da MAM, destacando áreas de consolidação e apontando caminhos para o avanço do conhecimento e das práticas neste campo dinâmico e estratégico da manufatura moderna

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

Benayiba, H.; Manresa, A.; & Vila, R. C. (2025) Simplifying sales and operations planning: Analyzing the influence os process steps on soft issues using design and engineering methodology for organizations. Intangible Capital, 21, 1, 116-130. https://doi.org/10.3926/ic.2670.

Boorman, J. (2013). S&OP: five steps to gaining necessary and appropriate buy-in. Foresight: The International Journal of Applied Forescating, 28, 37-42, Winter.

Callon, M., Courtial, J-P., & Laville, F. (1991) Co-word analysis as a tool for describing the network of interactions between basic and technological research: the case of polymer chemistry. Scientometrics 22,155–205, 1991. https://doi.org/10.1007/BF02019280.

Cobo, M. J.; López-Herrera, A. G.; Herrera-Viedma, E. & Herrea, F. (2011). A approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the fuzzy sets theory field. Journal of Informetrics, 5(1), 146-166. https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.10.002

Dobrzański, L. A.; Dobrzański, L. B.; Dobrzański-Danikiewicz, A. D.; & Kraszewska, M. (2020). Manufacturing powders of metals, theis alloys and ceramics and the importance of conventional and additive technologies for products manufacuturing in Industry 4.0 stage. International Scientific Journal – Archives of Materials Science and Engineering, 102, 1, 13-41. https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.145

Dobrzański, L. A.; Dobrzański, L. B.; & Dobrzański-Danikiewicz, A. D. (2020). Additive and hybrid techonlogies for products manufacturing using powders of metals, their alloys and ceramics. International Scientific Journal – Archives of Materials Science and Engineering, 102, 2, 59-85. https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.1525

Dogea, R.; Yan, X. T.; & Millar, R. (2022). Additive manufacturing process design for complex aircraft components. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 123, 4195-4211. https://doi.org/10.1007/s00170-022-10413-x

Kalla, C.; Scavarda, L. F.; Caiado, R. G. G.; & Hellingrath, B. (2025). Adapting sales and operations planning to dynamic and complex supply chains. https://doi.org/10.1007/s11846-025-00894-x

Kreuter, T.; Scavarda, L.F.; Thomé A. M. T.; Hellingrath, B.; & Seeling, M. X. (2021). Empirical and theoretical perspectives in sales and operations planning. In Review of Managerial Science. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/s11846-021-00455-y

Liu, Jinge.; Wen, Peng (2022). Metal vaporization and its influence during laser powder bed fusion process. Materials & Desing, 215. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110505

Iqbal, A.; Zhao, G.; Suhaimi, H.; He, N.; Hussain, G.; & Zhao, W. (2020). Readiness of subtractive and additive manufacturing and their sustainable amalgamation from the perspective of Industry 4.0: a comprehensive review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 111, 2475-2498. https://doi.org/10.1007/s00170-020-06287-6

Miguel, P.A.C. (2018). Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações, Editora GEN LTC, 3ªedição.

Nakagawa, E. Y.; Antonino, P. O.; Schnike, F.; Capilla, R.; Kuhn, T.; & Liggesmeyer, P. (2021). Industry reference architectures: State of the art and future trends. Computers & Industrial Engineering, 156. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107241

Nascimento, D. L. M.; Alencatro, V.; Quelhas, O. L. G.; Garza-Reyes, J. A.; Rocha-Lona, L.; & Tortorella, G. (2019). Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context. Journal of Manufacturing Technology Management, 30, 3, 607-627. https://doi.org/10.1.108/JMTM-03-2018-0071

Nicolas, F. N. P.; Thomé, A. M. T.; & Hellingrath, B. (2021). Usage of information technology and business analytics within sales and operations planning: a systematic literature review. Brazilian Journal of Operations & Production Management, 18, 3, e20211152. https://doi.org/10.14488/BJOPM.2021.023

Niharika, K.; Bora, U.; Bhadri, K.; Kadambi, P.; & Dhatrak, P. (2022). A comprehensive study on current and future trends towards the characteristics and enablers of industry 4.0. Journal of Industrial Information Integration, 100294. https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100294

Pedroso, C. B.; Calache, L D. D. R.; Junior, F. R. L. da Silva, A. L.; & Carpinetti, L. C. R. (2017). Proposal of a model for sales and operations planning (S&OP). Production, 27. https://doi.org/10.1590/0103-6513.20170024

Romão, L. O. P.; Scavarda, L. F.; & Seeling, M. X. (2021). Sales & operations planning: case study on the engineer-to-order production model in the entertainment industry. Brazilian Journal oi Operations & Production Management, 18, 3, e20211037. https://doi.org/10.14488/BJOPM.2021.016

Ruas, T. L., Pereira, L. Como Construir Indicadores De Ciência, Tecnologia E Inovação Utilizando Web of Science, Derwent World Patent Index, Bibexcel E Pajek?. Perspectivas em Ciência da Informação, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 52–81, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/pci/article/view/22944> Acesso em: 11 junho 2025.

Sajjad, A.; Ahmad, W.; Hussain, S.; & Mehmood, R. M. (2022). Development of Innovative Operational Flexibility Measurement Model for Smart Systems in Industry 4.0 Paradigm. IEEE Access, 10, 6760-6774. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3139544

Seeling, M. X.; Scavarda, L. F.; Thomé, A. M. T. (2019) A sales and operations planning application in the Brazilian subsidiary of a multinational chemical company. Brazilian Journal of Operations & Production Management, 16, 3. https://doi.org/10.14488/BJOPM.2019.v16.n3.a6

Seeling, M. X.; Panitz, C. E.; & Cassel, R. A. (2021). Sales and operations planning: learnings from 15 Brazilian companies. Brazilian Journal of Operations & Production Management, 18, 3. https://doi.org/10.14488/BJOPM.2021.019

Scott, C.; Lundgren, H.; Thompson, P.; Scott, C.; Lundgren, H.; & Thompson, P. (2018). Guide to Plan in Supply chain Management. Guide to Supply Chain Management: An End-to-End Perspective, 9-41. https://doi.org/10.14488/BJOPM.2021.019

Sharma, A. K.; Bhandari, R.; Pinca-Bretotean, C.; Sharma, C.; Dhakad, S. K.; & Mathur, A. (2021). A study of trends and industrial prospects of Industry 4.0. Materials Today: Proceedings, 47, 2364-2369. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.321

Stentoft, J.; Freytag, P. V.; & Mikkelsen, O. S. (2019). Improved Competitiveness through Implementation of Sales & Operations Planning. Department of Entrepreneurship and Relationship Management: University of Southern Denmark.

Terry, A; Beasley, R.; Davidz, H. L.; van den Hoek-Ostende, J.; & Glover, W. (2014). Soft Skills - What you haven't been told about Delivering Successful Systems! INCOSE International Symposium 21, 1, 868-884. https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2011.tb01247.x

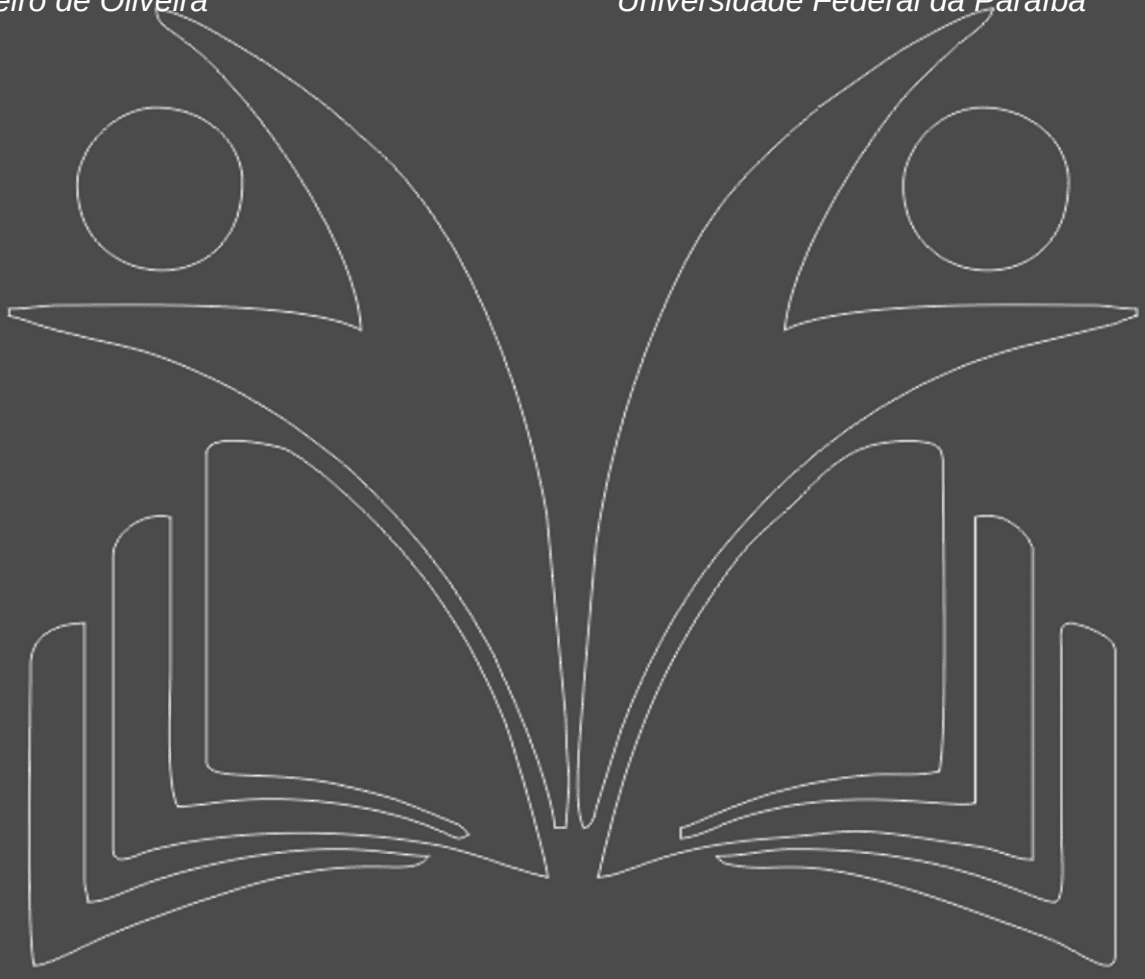
Capítulo 15

10.37423/260911398

APLICAÇÃO DA SEQUÊNCIA DE FIBONACCI EM ESTIMATIVAS DE ESFORÇO: ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DE CONSULTORIA EM GESTÃO DE PROJETOS

Ana Nívia Paulino de Lima — *Universidade Federal da Paraíba*

Jailson Ribeiro de Oliveira — *Universidade Federal da Paraíba*



RESUMO

Este artigo apresenta os resultados da aplicação prática da sequência de Fibonacci como técnica de estimativa na gestão de projetos de uma empresa de consultoria especializada em soluções digitais. Este estudo detalha o processo de implementação do método junto às equipes, destacando os principais desafios enfrentados, as adaptações necessárias e os impactos observados na qualidade das entregas e no planejamento das sprints. Foram utilizados dados coletados em reuniões de planning poker, retrospectivas e entrevistas com membros da equipe. Os resultados apontam melhorias na previsibilidade dos prazos, maior engajamento dos colaboradores no processo de estimativa e maior alinhamento entre esforço planejado e esforço real. Por fim, o estudo reforça a importância da capacitação da equipe e da adaptação da técnica à realidade organizacional, contribuindo para o fortalecimento da cultura ágil e para a melhoria contínua dos processos de gestão de projetos.

PALAVRAS-CHAVE: Sequência de Fibonacci; gestão de projetos; estimativas ágeis; estudo de caso; metodologia Scrum.

1 INTRODUÇÃO

A gestão de projetos, especialmente em organizações que desenvolvem soluções digitais sob demanda, exige processos de planejamento cada vez mais precisos e adaptáveis. Segundo Tinoco (2020), o gerenciamento de projetos contribui diretamente para o aumento da competitividade das empresas, pois estabelece padrões de qualidade e aprimora o controle das atividades para que sejam executadas de acordo com escopo, prazos e custos previamente definidos.

No entanto, mesmo com a adoção de metodologias ágeis e equipes qualificadas, muitas organizações ainda enfrentam dificuldades na padronização de estimativas de esforço, o que pode comprometer o equilíbrio na distribuição de tarefas, gerar atrasos e afetar a previsibilidade dos resultados. Além disso, a ausência de um modelo estruturado de comunicação entre as áreas envolvidas agrava a falta de clareza sobre a complexidade das demandas, dificultando o alinhamento entre planejamento e execução das sprints.

Diante desse cenário, este artigo tem como objetivo apresentar os resultados de um estudo de caso realizado em uma empresa de consultoria em soluções digitais, que implementou a sequência de Fibonacci como técnica de estimativa de esforço para melhorar a gestão de seus projetos. O trabalho evidencia os desafios enfrentados, as estratégias adotadas para sensibilizar e capacitar as equipes e os impactos positivos obtidos na qualidade das entregas, na organização das atividades e na construção de uma cultura orientada à melhoria contínua.

2 REFERENCIAL TÉORICO

A gestão de projetos, especialmente em contextos que adotam metodologias ágeis, tem como um de seus principais desafios a realização de estimativas de esforço realistas e padronizadas. Para Tinoco (2020), o gerenciamento eficaz de projetos aumenta a competitividade das organizações ao estabelecer padrões de qualidade, controle de prazos e otimização de custos, garantindo que os resultados estejam alinhados ao escopo definido.

No contexto de equipes ágeis, Cohn (2006) destaca que a estimativa de esforço deve ser colaborativa, incremental e adaptativa, de forma a reduzir incertezas e melhorar a previsibilidade. Uma das técnicas mais utilizadas é o Planning Poker, que combina a participação coletiva da equipe com o uso da sequência de Fibonacci para atribuir valores relativos de esforço às tarefas. Segundo Schwaber e

Sutherland (2020), essa prática, quando bem estruturada, favorece o alinhamento entre membros da equipe, fortalece a comunicação e aumenta o engajamento de todos no processo de planejamento.

Ferreira e Gonçalves (2021) ressaltam que a sequência de Fibonacci é amplamente adotada em métodos ágeis por representar uma progressão não linear, o que reflete melhor a complexidade crescente das tarefas de desenvolvimento de software e outras demandas tecnológicas. Além disso, a utilização de critérios padronizados na definição de prioridades e prazos permite uma distribuição mais equilibrada das atividades e reduz riscos de desalinhamento entre planejamento e execução (Juran, 2010).

Por fim, o Project Management Institute (PMI, 2017) enfatiza que boas práticas de gestão de projetos incluem o desenvolvimento contínuo das equipes e a consolidação de uma cultura organizacional orientada à melhoria dos processos. Nesse sentido, a adoção de técnicas de estimativa estruturadas, como a sequência de Fibonacci, contribui para criar um ambiente de trabalho mais previsível, transparente e sustentável.

3 MÉTODOS EMPREGADOS PARA COLETA DE DADOS E ESCOLHA DOS REFERENCIAIS

Este capítulo apresenta de forma clara e sistematizada os caminhos metodológicos adotados para o desenvolvimento do estudo de caso, garantindo transparência, reprodutibilidade e validade científica. Foram detalhados o tipo de pesquisa, os métodos utilizados, as estratégias de coleta e análise dos dados, bem como a justificativa para a escolha dos referenciais teóricos que fundamentaram a investigação.

A pesquisa adotou uma abordagem mista, combinando métodos qualitativos e quantitativos, o que possibilitou compreender os aspectos subjetivos da prática de estimativa na equipe, ao mesmo tempo em que quantificou os impactos da implementação da sequência de Fibonacci nos processos de planejamento. Classifica-se como exploratória, por aprofundar o entendimento sobre um fenômeno pouco estruturado na organização, e descritiva, ao retratar de forma sistemática o contexto estudado, suas limitações e os resultados obtidos.

O método de procedimento utilizado foi o de pesquisa-ação, permitindo a atuação direta da pesquisadora no ambiente organizacional, com observação participante e aplicação prática da técnica

em situações reais de trabalho. Essa imersão favoreceu ajustes contínuos na aplicação do método, além de possibilitar uma avaliação in loco dos seus impactos.

A coleta de dados foi realizada por meio de três instrumentos principais:

Observação direta, para identificar padrões de comportamento, práticas adotadas pela equipe durante as sprints e dificuldades no processo de planejamento e execução.

Análise documental, envolvendo atas de reuniões, registros de planejamento de sprints e históricos de tarefas.

Formulários estruturados, aplicados junto à equipe de desenvolvimento, compostos por perguntas objetivas e escalas de avaliação, construídos com base em literatura especializada sobre gestão ágil e técnicas de estimativa.

A amostra foi composta por uma equipe multidisciplinar, selecionada por conveniência, considerando disponibilidade e envolvimento direto com as atividades de planejamento e execução de projetos.

Para a análise dos dados, empregaram-se dois caminhos complementares:

Análise estatística descritiva, para tratar os dados quantitativos, utilizando recursos do Microsoft Excel para gerar gráficos comparativos (antes e depois da intervenção) que evidenciam variações em indicadores como esforço previsto, esforço realizado, tempo de entrega e índice de retrabalho.

Análise de conteúdo simplificada, para interpretação dos dados qualitativos, buscando evidenciar percepções, desafios e aprendizados decorrentes da aplicação prática da sequência de Fibonacci.

A escolha dos referenciais teóricos baseou-se em autores renomados na área de gestão de projetos, metodologias ágeis e técnicas de estimativa de esforço, como Tinoco (2020), Cohn (2006), Schwaber e Sutherland (2020), Ferreira e Gonçalves (2021) e o Project Management Institute (PMI, 2017). Esses autores fornecem suporte conceitual sólido para compreender os benefícios, limitações e condições de aplicabilidade das práticas adotadas.

4 PRINCIPAIS RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS E CASE PRÁTICO E APLICAÇÃO DO TEMA

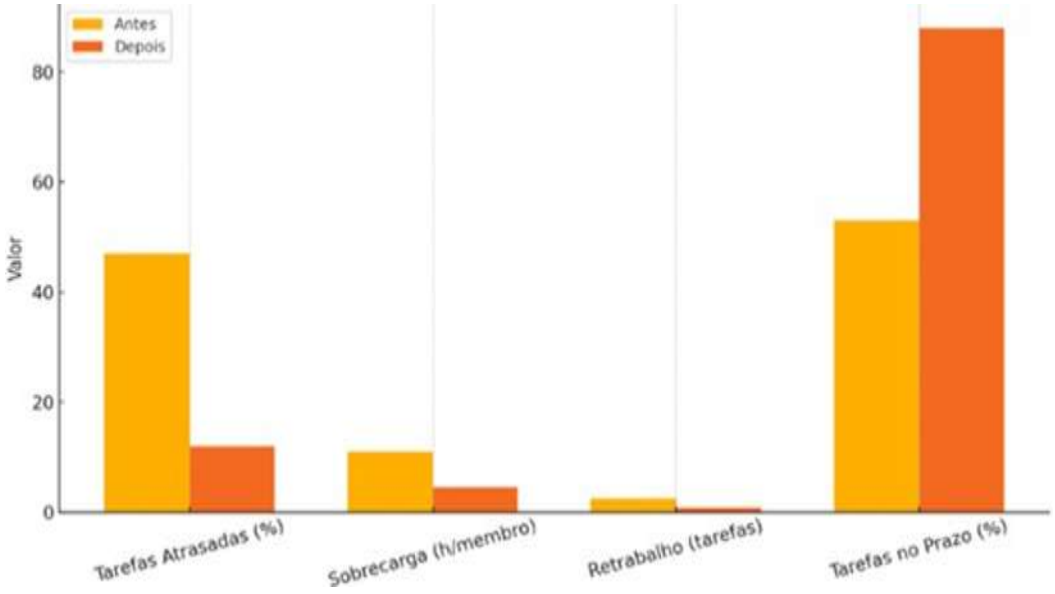
A revisão bibliográfica evidenciou que a aplicação de técnicas de estimativa baseadas na sequência de Fibonacci tem ganhado relevância em ambientes ágeis, principalmente por facilitar a comunicação entre os membros da equipe, reduzir subjetividades e aumentar a precisão na definição de prazos e esforços (COHN, 2006; SCHWABER; SUTHERLAND, 2020). Entre essas técnicas, destaca-se o Planning Poker, que, ao associar a sequência numérica à discussão coletiva, contribui para um processo mais participativo e transparente. Além disso, Tinoco (2020) ressalta que uma gestão de projetos estruturada e fundamentada em boas práticas de estimativa impacta diretamente a qualidade das entregas e a satisfação dos clientes.

No contexto prático da pesquisa, a aplicação da sequência de Fibonacci foi realizada em uma empresa de consultoria especializada em soluções digitais, que enfrentava desafios significativos na estimativa de esforço e no planejamento das sprints. Dentre os principais problemas, destacavam-se: ausência de padronização nas estimativas, concentração desequilibrada de tarefas, subjetividade na alocação de prazos e entregas recorrentes fora do cronograma.

Após a realização de um diagnóstico inicial e a implementação da sequência de Fibonacci como método de estimativa, foi possível confirmar e quantificar os desafios inicialmente mapeados. Antes da aplicação da técnica, as estimativas baseavam-se quase exclusivamente na percepção individual, o que resultava em desvios superiores a 40% entre o tempo previsto e o tempo real de execução das tarefas.

A análise comparativa entre sprints, ilustrada no Gráfico 1, evidenciou uma redução consistente nos percentuais de tarefas com atraso e retrabalho, bem como um aumento considerável no número de entregas realizadas dentro do prazo.

Gráfico 1 – Comparativo dos indicadores em gestão de projetos: antes e depois da Sequência de Fibonacci



Fonte: Elaboração própria (2025)

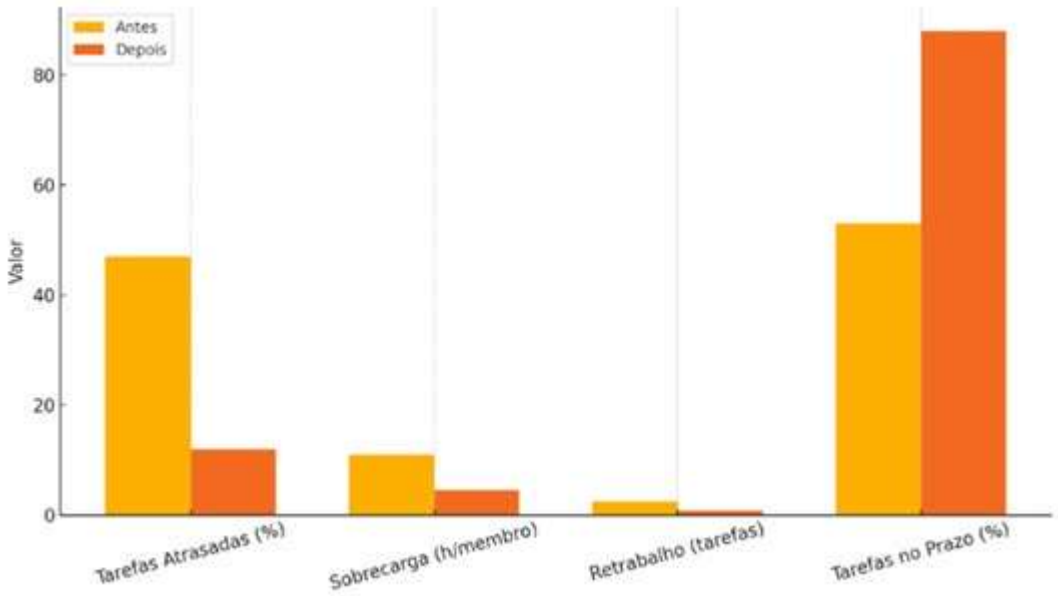
Esse gráfico revela que o indicador Tarefas Atrasadas (%) caiu de aproximadamente 50% para menos de 10%, refletindo avanços na previsibilidade e no controle de cronogramas. A Sobrecarga por membro também foi reduzida, indicando melhor distribuição das demandas e maior equilíbrio operacional. Além disso, a diminuição do Retrabalho (tarefas) aponta para entregas mais precisas, resultado de estimativas mais claras e adequadas. Já o indicador Tarefas no Prazo (%) aumentou significativamente, ultrapassando os 90%, o que reforça a efetividade da técnica adotada.

4.1 Análise dos critérios padronizados e impactos na eficiência

A aplicação da sequência de Fibonacci foi realizada de forma gradual, acompanhada de reuniões de retrospectiva e monitoramento de indicadores de desempenho. A padronização das estimativas incentivou debates mais qualificados sobre o escopo das atividades e fortaleceu o entendimento coletivo da complexidade envolvida em cada tarefa.

O Gráfico 2 apresenta a evolução de seis indicadores de desempenho após a adoção da técnica:

Gráfico 2 – Comparativo do desempenho dos indicadores em projetos: antes e depois da Sequência Fibonacci



Fonte: Elaboração própria (2025)

Principais resultados observados:

1. Tarefas Concluídas no Prazo (%): aumento de 53,0% para 88,0%;
2. Sobrecarga Média por Membro (h): redução de 11,0 para 6,0 horas;
3. Retrabalho por Sprint (tarefas): queda de 4,5 para 2,5 tarefas;
4. Clareza nas Estimativas (0 a 10): elevação de 4,5 para 8,7;
5. Previsibilidade das Sprints (0 a 10): melhoria de 5,0 para 8,5.

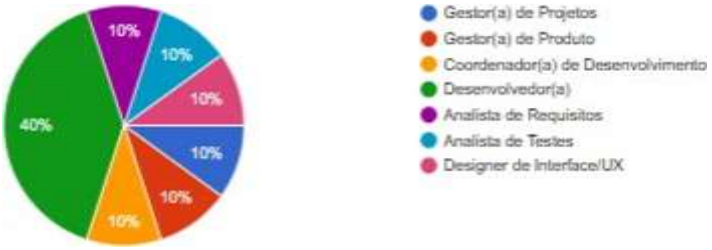
Esses dados evidenciam impactos diretos na eficiência operacional, no equilíbrio da carga de trabalho e na maturidade dos processos de estimativa e planejamento.

4.2 Avaliação qualitativa da equipe

Para complementar a análise quantitativa, foi aplicado um formulário estruturado (Apêndice A) a 10 membros da equipe, incluindo gestores, desenvolvedores, analistas e designers. A pesquisa buscou captar percepções quanto à clareza das estimativas, organização das tarefas, dinâmica das reuniões e efetividade geral da técnica.

O Gráfico 3 apresenta o perfil dos respondentes:

Gráfico 3 – Perfil do Respondente



Fonte: Elaboração própria (2025)

Na sequência, o Gráfico 4 exibe as respostas à pergunta: “As reuniões de planejamento tornaram-se mais produtivas e participativas após a adoção da técnica?”

Gráfico 4 – Avaliação das reuniões de planejamento

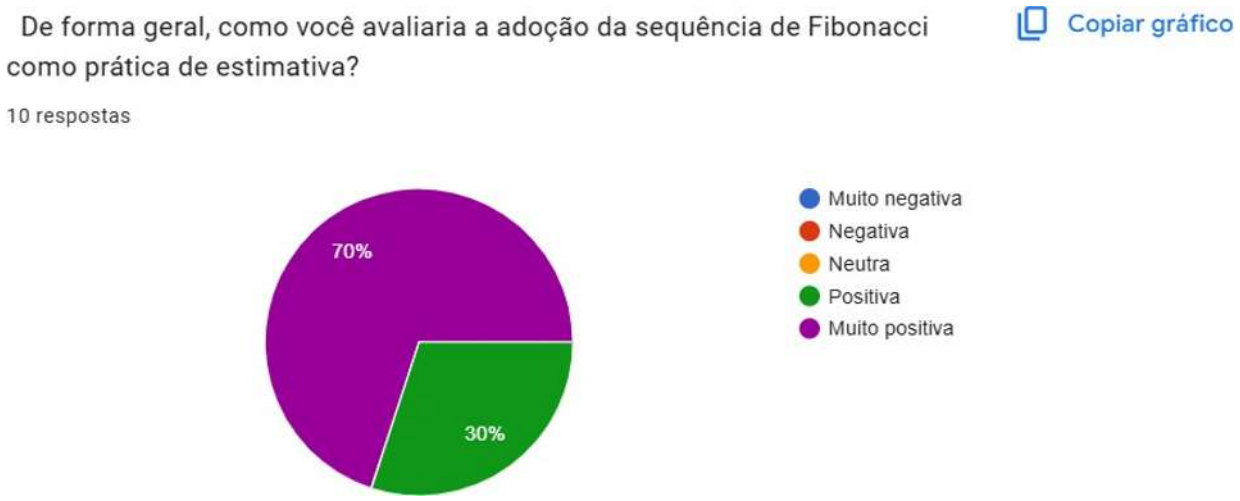


Fonte: Elaboração própria (2025)

A maioria dos participantes concordou total ou parcialmente que as reuniões se tornaram mais colaborativas, com maior engajamento dos envolvidos. Esse dado reforça a importância da técnica na promoção de alinhamento, participação e clareza entre os membros.

Por fim, o Gráfico 5 mostra a avaliação geral da equipe sobre a adoção da técnica:

Gráfico 5 – Avaliação geral sobre a técnica de estimativa



Fonte: Elaboração própria (2025)

A predominância das categorias “positiva” e “muito positiva” indica ampla aceitação da sequência de Fibonacci como prática eficiente de estimativa, com destaque para os ganhos em organização, previsibilidade, engajamento e qualidade do planejamento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste estudo de caso evidenciou que a aplicação estruturada da sequência de Fibonacci como técnica de estimativa de esforço contribui significativamente para o fortalecimento da gestão de projetos em organizações de consultoria que atuam com metodologias ágeis. A pesquisa demonstrou que, mesmo em equipes qualificadas, a ausência de padronização na comunicação e no planejamento pode gerar atrasos, desalinhamentos e retrabalhos que comprometem a eficiência e a qualidade das entregas.

A partir da adoção da sequência de Fibonacci em conjunto com práticas como o Planning Poker, foi possível observar melhorias na previsibilidade dos prazos, no equilíbrio da distribuição de tarefas e no engajamento da equipe. O processo também promoveu uma maior integração entre as áreas envolvidas no planejamento e execução dos projetos, favorecendo um ambiente colaborativo e mais alinhado com os princípios ágeis.

Além dos ganhos operacionais, o estudo destaca a importância de sensibilizar e capacitar os profissionais envolvidos, de forma a consolidar uma cultura organizacional orientada à melhoria contínua, à padronização de processos e à adoção de boas práticas de gestão.

Contudo, reconhece-se que a implementação de novas técnicas demanda tempo de adaptação, acompanhamento constante e ajustes para atender às especificidades de cada equipe e projeto. Assim, recomenda-se que futuras pesquisas aprofundem a análise dos impactos em contextos distintos, ampliem a amostra e explorem a integração da técnica com ferramentas tecnológicas de apoio à gestão.

Em síntese, os resultados reforçam o potencial da sequência de Fibonacci como instrumento estratégico para aprimorar a prática de estimativas em ambientes ágeis, contribuindo para entregas mais previsíveis, clientes mais satisfeitos e equipes mais engajadas.

REFERÊNCIAS

OHN, Mike. Agile Estimating and Planning. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2006.

FERREIRA, V. A.; GONÇALVES, M. A. O uso da sequência de Fibonacci em métodos ágeis de estimativa: uma revisão da literatura. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v. 6, n. 1, p. 65-78, 2021.

JURAN, J. M. Juran's Quality Handbook: The Complete Guide to Performance Excellence. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (PMI). Um Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK). 6. ed. Pennsylvania: Project Management Institute, 2017.

SCHWABER, Ken; SUTHERLAND, Jeff. The Scrum Guide: The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game. Scrum.org, 2020. Disponível em: https://scrumguides.org/. Acesso em: [data de acesso].

TINOCO, José Eduardo de S. Gerenciamento de Projetos: Teoria, Práticas e Casos. 5. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2020.

PMI – PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos (Guia PMBOK). 7. ed. Newtown Square: Project Management Institute, 2021.

SCHWABER, Ken; SUTHERLAND, Jeff. Scrum Guide: O guia definitivo para o Scrum – As regras do jogo. Scrum.org, 2020.

SEVERINO, Antônio Joaquim. Metodologia do trabalho científico. 24. ed. São Paulo: Cortez, 2016.
STEWART, Ian. A Matemática da Vida. São Paulo: Zahar, 2006.

VARGAS, Ricardo V. Manual prático do plano de projeto. Rio de Janeiro: Brasport, 2020.

YIN, Robert K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

Capítulo 16

10.37423/260911401

PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA BORRA DE CAFÉ PARA REMOÇÃO DA COLORAÇÃO DA ÁGUA DA LAGOA DO PARQUE IPANEMA

Gabriel Guilherme Soares de Oliveira — *Centro Universitário Católica do Leste de Minas Gerais*

Beatriz de Sena Siqueira — *Centro Universitário Católica do Leste de Minas Gerais*

Hebert Coura Santiago — *Centro Universitário Católica do Leste de Minas Gerais*

Lorran Augusto Bernardino Neves — *Centro Universitário Católica do Leste de Minas Gerais*

Pedro Henrique Villela Alves — *Centro Universitário Católica do Leste de Minas Gerais*

Flávia Souza Pio — *Centro Universitário Católica do Leste de Minas Gerais*

RESUMO

O presente estudo avaliou a viabilidade técnica e ambiental da produção de carvão ativado a partir de borra de café para o tratamento de águas residuais. A biomassa residual foi submetida a processos sucessivos de higienização, peneiramento, pirólise a 400 °C e ativação química com solução aquosa de ácido fosfórico (H_3PO_4), visando à formação de uma matriz porosa com alta área superficial. A análise granulométrica demonstrou distribuição adequada das partículas, com diâmetro de Sauter favorável à adsorção. A aplicação do material em um sistema de adsorção com efluente coletado na Lagoa do Parque Ipanema resultou em remoção de 96,15% de turbidez e 84,90% de cor, e com resultado abaixo do estabelecido pelo Ministério da Saúde no que tange à água potável. Durante os testes com azul de metileno, o carvão ativado apresentou capacidade de adsorção de 1,239 mg/g, com ótimo ajuste aos modelos de Langmuir (R^2 = 0,9984) e Freundlich (R^2 = 0,9954), evidenciando a complexidade do material ao se comportar como uma monocamada e ter heterogeneidade superficial em um mesmo leito fixo. A análise termodinâmica revelou variações negativas na energia livre de Gibbs (ΔG°), confirmando a espontaneidade do processo adsortivo, além de indicar aumento na desordem do sistema, conforme sugerido pelos valores positivos de entropia (ΔS°). Os dados obtidos reforçam o potencial do carvão de borra de café como um adsorvente eficiente, de baixo custo e sustentável para aplicações em saneamento ambiental.

Palavras-chave: Adsorção. Carvão Ativado. Borra de Café. Tratamento de Águas Residuais. Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A degradação da qualidade da água em corpos hídricos urbanos é uma preocupação crescente, especialmente em áreas de lazer e preservação ambiental. No Parque Ipanema, em Ipatinga-MG, a lagoa desempenha um papel essencial tanto para o equilíbrio ecológico quanto para o bem-estar da população local. No entanto, fatores como o descarte inadequado de resíduos, a presença de contaminantes orgânicos e inorgânicos, bem como o escoamento superficial podem comprometer a qualidade da água, afetando a biodiversidade e limitando seu uso recreativo.

Dentre os poluentes encontrados em corpos d'água, corantes sintéticos e metais pesados destacam-se por sua alta estabilidade química e resistência à degradação biológica (Von Sperling, 2014). Para mitigar esses impactos, a adsorção tem se mostrado uma alternativa eficiente e de baixo custo, especialmente com o uso de resíduos agroindustriais e biopolímeros (Babel; Kurniawan, 2003).

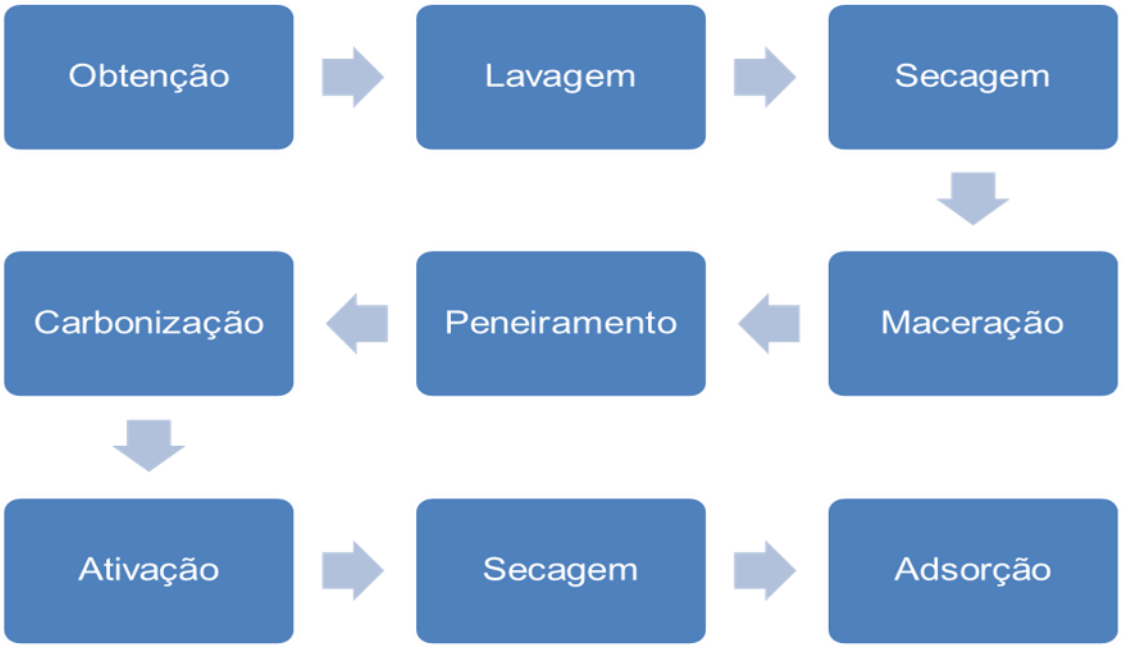
A adsorção pode ser compreendida como uma operação de transferência de massa em que determinados sólidos apresentam a capacidade de concentrar, em sua superfície, substâncias presentes em fluidos líquidos ou gasosos, viabilizando a separação dos componentes presentes nos fluidos. Esse fenômeno ocorre predominantemente na superfície externa dos sólidos, de modo que uma elevada área superficial por unidade de massa sólida favorece significativamente o desempenho do processo (Ruthven, 1984, apud Nascimento et al., 2020, p. 14).

Diante desse contexto, este estudo busca analisar a qualidade da água da Lagoa do Parque Ipanema e testar um método de remoção da cor de efluentes utilizando carvão ativado obtido da borra de café. A pesquisa visa contribuir para a conservação dos recursos hídricos locais, incentivando práticas ambientais responsáveis e acessíveis.

2 METODOLOGIA

O processo de produção do carvão ativado foi realizado conforme o desenvolvimento presente na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma do processo de produção



Fonte: Autores, 2025.

2.1 Coleta e Higienização

O efluente foi coletado em diferentes pontos que circundam a lagoa, buscando representar uma amostragem adequada das variações locais. Para caracterização inicial da água, foi utilizada uma sonda multiparamétrica portátil YSI Pro DDS (Digital Sampling System), capaz de realizar uma pré-análise de parâmetros físico-químicos como pH, turbidez e cor aparente. Esse modelo é projetado para oferecer medições precisas e em tempo real de múltiplos parâmetros relacionados à qualidade da água, como oxigênio dissolvido (DO), condutividade e temperatura, sendo ideal para monitoramento de água em diferentes condições.

A borra de café utilizada foi obtida a partir do uso doméstico dos próprios autores e, logo após a coleta, passou por um processo de higienização. O material foi lavado com água destilada em abundância, com o uso do funil e papel filtro, para remover compostos solúveis que poderiam comprometer a integridade da estrutura carbonácea. Entre as substâncias eliminadas durante a lavagem destacam-se:

- cafeína: alcalóide solúvel em água;
- ácidos orgânicos: clorogênico, cafeico e acético, responsáveis pela acidez da matriz;
- açúcares residuais: glicose, frutose e sacarose, que favorecem o crescimento microbiano;

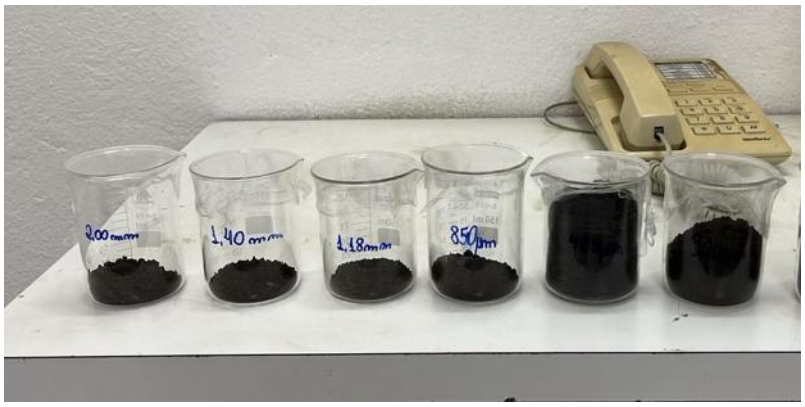
- compostos fenólicos: que podem competir com os poluentes durante a adsorção;
- sais minerais: íons como Na^+, K^+, Ca^{2+} e Mg^{2+}, que interferem em pH e condutividade;
- aminoácidos e proteínas solúveis: que, ao se degradarem, podem gerar subprodutos indesejáveis.

Esse pré-tratamento é essencial para garantir que o carvão final possua maior pureza, elevada área superficial e melhor desempenho na adsorção. Após a lavagem, a borra foi seca em estufa a 105 °C por 24 horas, ou até secagem completa.

2.2 Peneiramento

A borra seca foi submetida à análise granulométrica por peneiramento com o objetivo de padronizar o tamanho das partículas. Foram utilizadas peneiras com aberturas de 2000 µm, 1400 µm, 1180 µm, 850 µm, 425 µm e 300 µm. A Figura 2 apresenta as amostras de borra de café retidas em cada peneira após o processo de triagem granulométrica.

Figura 2 – Amostras de borra de café separadas por granulometria, conforme peneiramento (malhas de 2000 µm a 300 µm).



Fonte: Autores, 2025.

A massa retida em cada peneira foi pesada em uma balança analítica. A distribuição de frequência (fração mássica em cada faixa de tamanho) foi calculada pela Equação 1, na qual x_i é a porcentagem em massa da fração retida na peneira, m_i é a massa retida na peneira e m_{total} é a massa total da amostra peneirada.

$$x_i(\%) = \left(\frac{m_i}{m_{total}}\right) x\ 100 \qquad (1)$$

Dois modelos clássicos foram utilizados para ajustar os dados da distribuição granulométrica. O modelo Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS) foi utilizado para descrever a distribuição de partículas em sistemas fragmentados e assume uma relação logarítmica linear entre o percentual acumulado e o diâmetro médio (Equação 2), sendo X a porcentagem acumulada passante, Di o diâmetro médio da peneira e n e b constantes da regressão linear.

$$ln(X) = n \times ln(Di) + b \qquad (2)$$

O modelo de Rosin-Rammler-Bennett (RRB) baseia-se em uma função de Weibull para descrever a distribuição de partículas, e é amplamente utilizado para materiais com distribuição assimétrica (Equação 3).

$$ln[-ln(1 - X)] = n \times ln(Di) + b \qquad (3)$$

Esse modelo proporciona uma melhor linearização dos dados para distribuições finas e assimétricas. Os parâmetros n e b são determinados por meio da regressão linear dos dados transformados. Os gráficos de ambos os modelos foram plotados no Excel com base na conversão logarítmica dos dados, permitindo avaliar o coeficiente de determinação 2, como critério de ajuste. Um dos parâmetros mais relevantes neste contexto é o diâmetro de Sauter (D□), que corresponde ao diâmetro de uma partícula esférica cuja razão entre volume e área superficial é equivalente à das partículas reais. É especialmente útil em processos de transferência de massa, como a adsorção, pois partículas com menor D□ tendem a apresentar maior área superficial específica, favorecendo a interação com o adsorvato. O diâmetro de Sauter é calculado pela Equação 4.

$$dps = \left(\frac{\Sigma x_i d_i^{\ 3}}{\Sigma x_i d_i^{\ 2}}\right) \qquad (4)$$

A determinação de D□ permite correlacionar a distribuição de tamanho das partículas com o desempenho do carvão ativado obtido neste estudo, uma vez que materiais com partículas mais finas e maior área superficial específica tendem a apresentar melhor capacidade de adsorção.

2.3 Pirólise

Após a higienização, seguiu-se para a pirólise em forno mufla sob atmosfera inerte, com o objetivo de carbonizar a biomassa. A pirólise consiste na degradação térmica do material orgânico em condições controladas de temperatura e, preferencialmente, com atmosfera inerte ou com limitado suprimento de oxigênio, promovendo a liberação de compostos voláteis e a formação de uma matriz carbonácea porosa. A metodologia adotada utilizou temperatura de 400 °C durante 1 hora, conforme reportado na literatura como condição eficaz para a produção de carvão a partir de resíduos lignocelulósicos.

Essa temperatura é suficiente para romper ligações covalentes presentes nos principais constituintes da biomassa (celulose, hemicelulose e lignina), promovendo a saída de alcatrões, gases e vapores orgânicos, enquanto o carbono residual se organiza em uma estrutura sólida. Ao final, obteve-se um material carbonizado escuro e friável, com características morfológicas e químicas adequadas para posterior ativação e uso como adsorvente. Ressalta-se que a pirólise a 400 °C proporciona um bom equilíbrio entre rendimento de massa e desenvolvimento de porosidade, fator desejável em aplicações ambientais.

A Figura 3 mostra o cadinho contendo a borra tampada com papel alumínio antes de ser levado ao forno mufla.

Figura 3 – Cadinho com a borra de café tampado com papel alumínio para pirólise a 400 °C por 1 hora.



Fonte: Autores, 2025.

2.4 Ativação Química

A ativação química do material carbonizado foi realizada por meio de impregnação em soluções ativantes, sem aplicação de aquecimento posterior. Essa abordagem visa modificar a superfície do carvão por meio da introdução de grupos funcionais e remoção de impurezas residuais, favorecendo a formação de sítios ativos com afinidade por contaminantes em solução aquosa.

Dois agentes ativantes foram utilizados para fins comparativos: ácido fosfórico (H_3PO_4) e hidróxido de potássio (KOH), ambos em solução aquosa 1 mol/L. A escolha desses agentes partiu de fontes encontradas na literatura, nas quais Maia et al. (2024) observaram que a utilização de KOH atingiu uma eficiência máxima de remoção de cor de 80,45%, e Santana & Carvalho (2024) apontaram 99 % de remoção de azul de metileno utilizando H_3PO_4. Para cada tratamento, o carvão previamente carbonizado foi imerso nas soluções, respeitando uma razão massa/massa de 1:3, com leve agitação inicial e repouso por 24 horas à temperatura ambiente.

O H_3PO_4 atua como agente desidratante e fosforilante, promovendo a abertura de poros e a inserção de grupos fosfato na superfície. Já o KOH facilita reações ácido-base e a formação de grupos hidroxila e carbonila, que aumentam a polaridade da superfície e favorecem a adsorção de espécies iônicas.

Após o período de impregnação, os carvões foram filtrados e extensivamente lavados com água destilada até que o pH do filtrado atingisse valores entre 6 e 7, garantindo a neutralização dos resíduos químicos. Por fim, os materiais foram secos em estufa a 105 °C por 24 horas e armazenados em frascos herméticos para uso nos testes de adsorção.

2.5 Montagem da Coluna de Adsorção

Para os testes de adsorção, foi construída uma coluna utilizando uma bureta de 50 mL como corpo principal. Na base, adicionou-se uma camada de lã de vidro como suporte inerte. Sobre ela, foram depositados 0,6000 g de carvão ativado, formando o meio adsorvente. Em seguida, foram adicionados 20 mL da água coletada da Lagoa do Parque Ipanema. Durante a percolação, observou-se a passagem da água pelo carvão, permitindo acompanhar visualmente o processo de remoção da coloração e outros contaminantes presentes.

2.6 Equilíbrio de Adsorção

Quando o adsorvato é colocado em contato com o adsorvente, as moléculas ou íons tendem a fluir do meio aquoso para a superfície do material até que a concentração de soluto na fase líquida (Ce) permaneça constante. Nesse estágio, diz-se que o sistema atingiu o estado de equilíbrio, e a capacidade de adsorção no equilíbrio (qe) é determinada (Nascimento et al., 2014). Para a avaliação do processo de adsorção, utilizou-se o corante azul de metileno como contaminante modelo. O equilíbrio de adsorção foi estudado a partir da relação entre a concentração inicial e final da solução após o contato com o carvão ativado obtido a partir de borra de café. A quantidade de adsorvato retido por unidade de massa do adsorvente, no estado de equilíbrio, foi determinada pela Equação 5.

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \times V}{m} \qquad (5)$$

Em que:

- q_e é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg/g);
- C_0 é a concentração inicial do azul de metileno (mg/L);
- C_e é a concentração de equilíbrio (mg/L);
- V é o volume da solução (L);
- m é a massa do adsorvente (g).

As amostras foram agitadas por um tempo suficiente para garantir o equilíbrio, e posteriormente as concentrações finais foram determinadas por espectrofotometria UV-Vis.

Para correlacionar os dados de absorbância com a concentração do azul de metileno, foi construída uma curva de calibração. Soluções padrão com concentrações conhecidas do corante, variando de 0,25 a 4 ppm, foram preparadas e suas absorbâncias medidas em λ = 664 nm, comprimento de onda característico do azul de metileno. A equação da reta e o coeficiente de correlação R^2 foram determinados, sendo utilizados para o cálculo das concentrações das amostras após o processo de adsorção.

2.7 Modelos de Isotermas

Para compreender o comportamento do processo de adsorção, os dados experimentais foram ajustados aos modelos de isotermas de Langmuir e Freundlich, que descrevem a interação entre o adsorvato e o adsorvente.

A isoterma de Langmuir assume a formação de uma monocamada de adsorvato em uma superfície homogênea do adsorvente, com sítios de adsorção energeticamente equivalentes. Sua forma linear, comumente utilizada para facilitar a análise dos parâmetros, é representada na Equação 6.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max} \cdot b} + \frac{C_e}{q_{max}} \qquad (6)$$

Onde:

- q_{max} é a capacidade máxima de adsorção (mg/g);
- b é a constante de Langmuir relacionada à afinidade do adsorvente pelos sítios de adsorção (L/mg).

A isoterma de Freundlich é um modelo empírico que assume uma superfície heterogênea, com sítios de adsorção de diferentes energias. Sua forma linear é dada na equação 7.

$$log\ q_e = log\ K_f + \frac{1}{n} \cdot log\ C_e \qquad (7)$$

Onde:

- K_f é a constante de Freundlich (indicativa da capacidade de adsorção);
- n é o parâmetro de intensidade da adsorção.

Ambos os modelos foram aplicados aos dados experimentais, e os parâmetros foram obtidos por regressão linear, avaliando-se a qualidade do ajuste por meio do coeficiente de determinação R2.

2.8 Análise Termodinâmica da Adsorção

Com o objetivo de compreender melhor a natureza do processo de adsorção da borra de café na remoção de contaminantes da água da Lagoa do Parque Ipanema, foram avaliados parâmetros termodinâmicos como a variação da energia livre de Gibbs (ΔG°), entalpia (ΔH°) e entropia (ΔS°). Esses parâmetros indicam, respectivamente, a espontaneidade, o caráter endotérmico ou exotérmico e o grau de desordem envolvido na adsorção.

A equação de Van't Hoff (Equação 8) foi empregada para a obtenção de ΔH° e ΔS°, relacionando a constante de equilíbrio com a temperatura, enquanto a energia livre de Gibbs foi calculada com base em sua relação direta com a constante de equilíbrio (Atkins; de Paula, 2018).

$$\ln K = -\frac{\Delta H^\circ}{RT} + \frac{\Delta S^\circ}{R} \qquad (8)$$

Onde:

- ln K = logaritmo natural da constante de equilíbrio;
- ΔH° = variação da entalpia padrão (J/mol);
- ΔS° = variação da entropia padrão (J/mol × K);
- R = constante universal dos gases (8,314 J/mol × K);
- T = temperatura absoluta (K).

A partir dessa equação, ao se construir um gráfico de ln K em função de 1/T, pode-se obter ΔH° (pela inclinação) e ΔS° (pelo intercepto). Além disso, a variação de energia livre de Gibbs foi determinada pela Equação 9.

$$\Delta G^\circ = -RT\ln K \qquad (9)$$

Conforme destacado por Atkins e de Paula (2018), valores negativos de ΔG° indicam que o processo é espontâneo nas condições analisadas. Portanto, a análise termodinâmica complementa os dados experimentais, oferecendo uma compreensão mais profunda das interações entre os contaminantes presentes na água e a superfície do carvão ativado obtido da borra de café.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica (Tabela 1) da borra de café foi avaliada por meio de peneiramento, e os dados obtidos permitiram a construção de curvas de frequência e de distribuição acumulada em massa, bem como a aplicação de modelos matemáticos para descrever o comportamento das partículas.

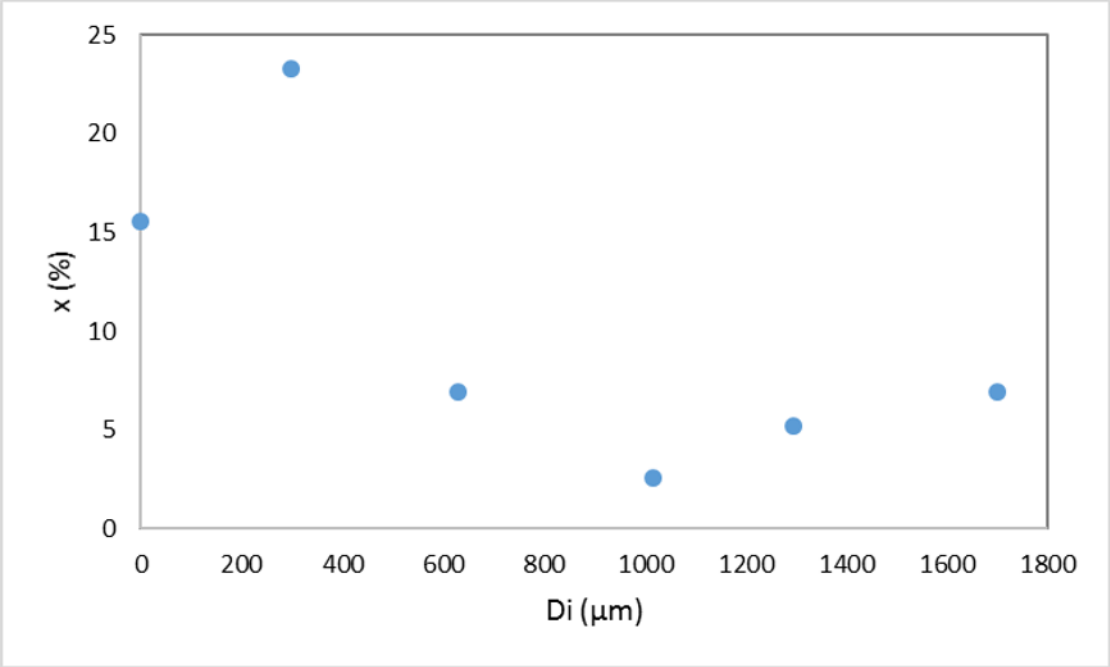
Tabela 1: Distribuição granulométrica

Peneira	Abertura da Peneira Massa			Massa	Fração Retida		Fração passante	
(mesh)	- Di(µm)	+Di(µm)	Di(µm)	Retida (g)	xi	xi (%)	Xi	Xi (%)
10/14	2000	1400	1700	8	0,0690	6,90	0,9310	93,10
14/16	1400	1190	1295	6	0,0517	5,17	0,8793	87,93
16/20	1190	841	1016	3	0,0259	2,59	0,8534	85,34
20/40	841	420	631	8	0,0690	6,90	0,7845	78,45
40/50	420	297	359	46	0,3966	39,66	0,3879	38,79
50	297	297	297	27	0,2328	23,28	0,1552	15,52
panela	panela	panela	0	18	0,1552	15,52	0,0000	0,00
		Total		48	1,000	100		

Fonte: Autores, 2025.

A distribuição de frequência (Figura 4) obtida indicou que a maior proporção mássica da borra de café encontra-se concentrada na faixa entre 250 µm e 500 µm, correspondente ao intervalo de maior predominância de partículas. Este perfil sugere que o processo de secagem e trituração resultou em um material predominantemente fino, com significativa fração de partículas passantes nas malhas inferiores.

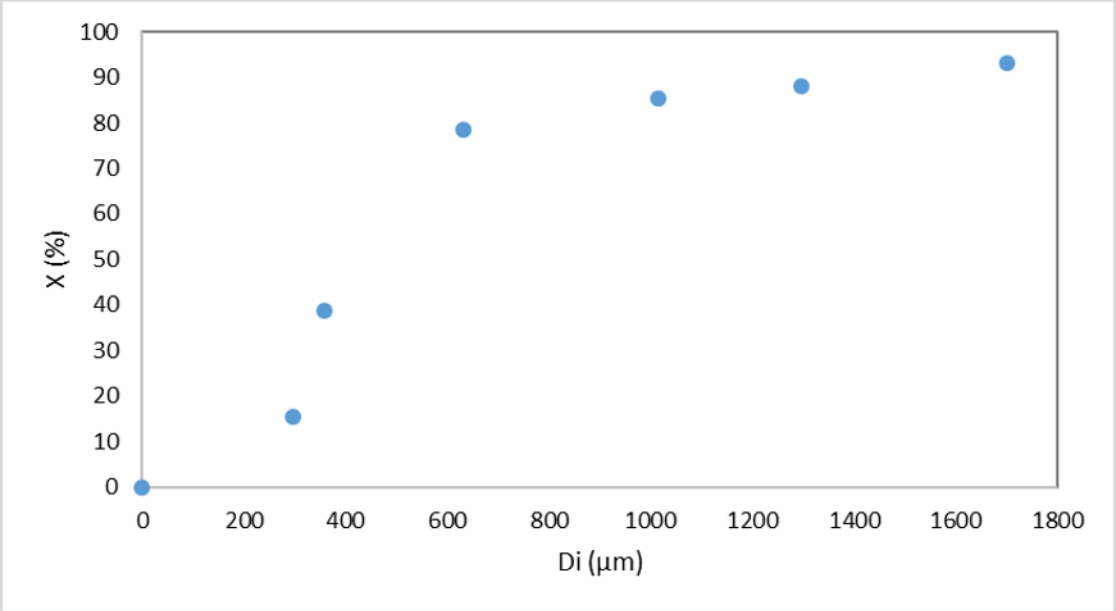
Figura 4: Distribuição de frequência



Fonte: Autores, 2025.

A curva de distribuição acumulada em massa (Figura 5) revelou que aproximadamente 75% da amostra possui diâmetro inferior a 841 µm.

Figura 5: Distribuição cumulativa

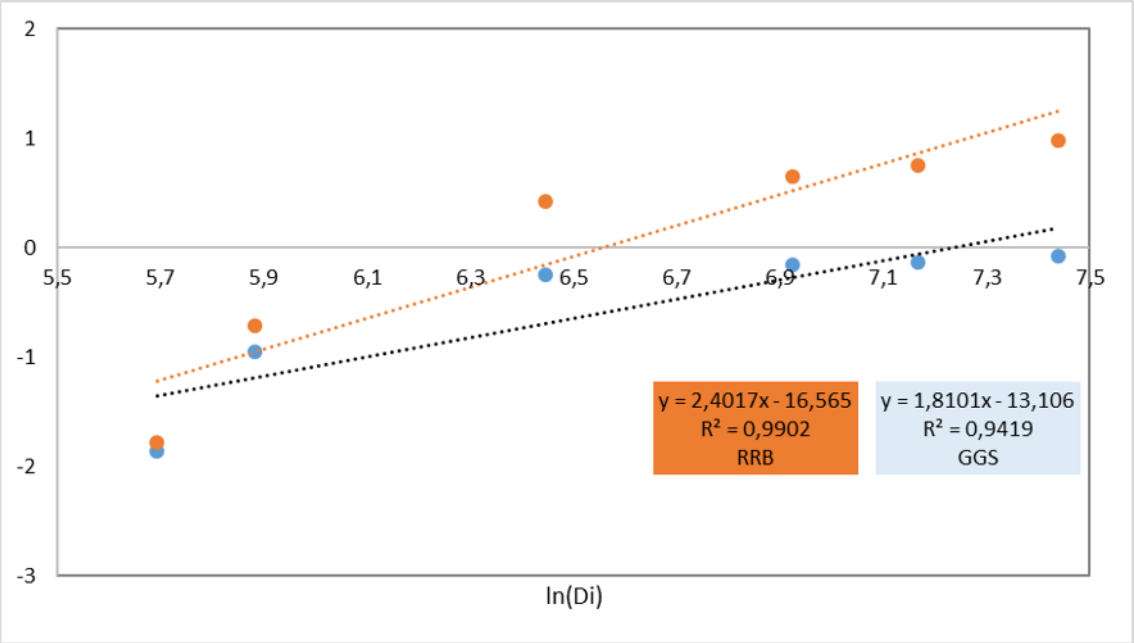


Fonte: Autores, 2025.

Esses dados indicam uma distribuição de partículas majoritariamente finas, o que é favorável para aplicações em adsorção, já que partículas menores tendem a apresentar maior área superficial específica e, consequentemente, maior capacidade de interação com o adsorvato.

Outra informação importante é a partir dos modelos RRB e GGS, a análise permitiu avaliar a distribuição e uniformidade das partículas do adsorvente, o que é fundamental para entender o desempenho do material nos testes de adsorção. A partir dos dados experimentais, ajustaram-se regressões lineares para os dois modelos, conforme apresentado na Figura 6. Os coeficientes de determinação (R^2) foram utilizados para avaliar a qualidade do ajuste.

Figura 6: Modelos RRB e GGS



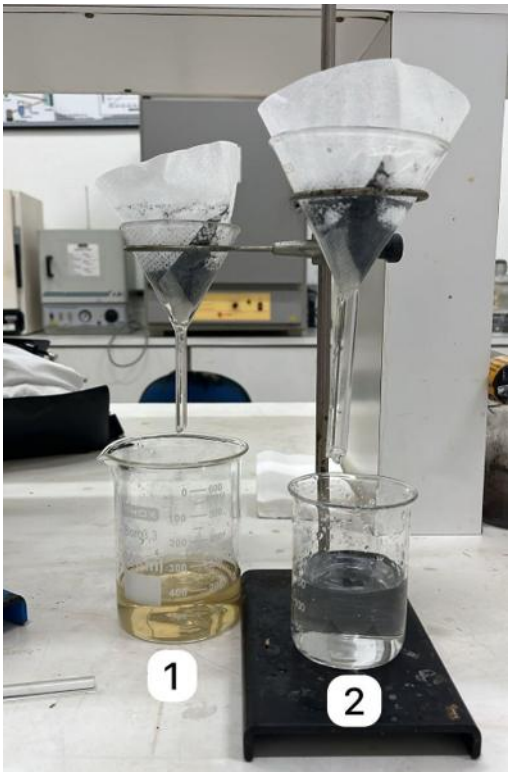
Fonte: Autores, 2025.

Os dados indicam que o modelo RRB apresentou um ajuste superior, com um coeficiente de correlação mais próximo de 1, demonstrando maior representatividade da distribuição de tamanho de partículas do material preparado. O valor mais elevado do expoente n sugere uma distribuição granulométrica mais uniforme, o que é desejável para processos de adsorção, pois implica maior previsibilidade no empacotamento das partículas e na dinâmica de fluxo através do leito. Esses resultados reforçam a adequação do carvão ativado de borra de café como um material com distribuição granulométrica controlada, favorável ao desempenho em colunas de adsorção, como utilizado nos testes com azul de metileno.

3.2 Comparação ativação química

Após o processo de ativação química dos carvões produzidos, foi realizada a etapa de lavagem com água destilada, a fim de remover os resíduos dos agentes ativantes. Durante esse procedimento, observou-se uma diferença notável entre as amostras ativadas com KOH e H_3PO_4. O carvão ativado com KOH, uma base forte, liberou uma água de lavagem com coloração amarronzada intensa, sugerindo possível solubilização de compostos residuais presentes na matriz carbonácea. Já a amostra ativada com H_3PO_4 apresentou água de lavagem praticamente incolor, indicando maior estabilidade química e menor liberação de substâncias solúveis (Figura 7).

Figura 7 – Comparação entre a água de lavagem dos carvões ativados: (1) água residual escura do carvão ativado com KOH, (2) água límpida da lavagem do carvão ativado com H_3PO_4.



Fonte: Autores, 2025.

Considerando essa diferença significativa, optou-se por seguir com os ensaios de adsorção utilizando o carvão ativado com H_3PO_4, considerando sua maior estabilidade e menor risco de interferência no meio aquoso.

3.3 Análise do efluente

A água contaminada foi coletada diretamente da Lagoa do Parque Ipanema, apresentando inicialmente 52 FAU de turbidez e 77,5 Hz de cor. Em cada ciclo de purificação, 20 mL da água da lagoa foram adicionados à coluna de adsorção. O experimento foi repetido por cinco ciclos consecutivos, e observou-se que, ao longo das passagens, a água tratada manteve-se visualmente límpida. Os valores de turbidez e cor da água purificada ao longo do processo apresentaram significativa redução. No primeiro ciclo, a água tratada já apresentava 3 FAU de turbidez e 14,4 Hz de cor. No último ciclo (quinta passagem), os valores reduziram ainda mais, atingindo 2 FAU de turbidez e 11,7 Hz de cor.

Esses valores estão dentro dos limites estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde, que define como aceitáveis para água potável:

- Turbidez ≤ 5 FAU;
- Cor aparente ≤ 15 Hz.

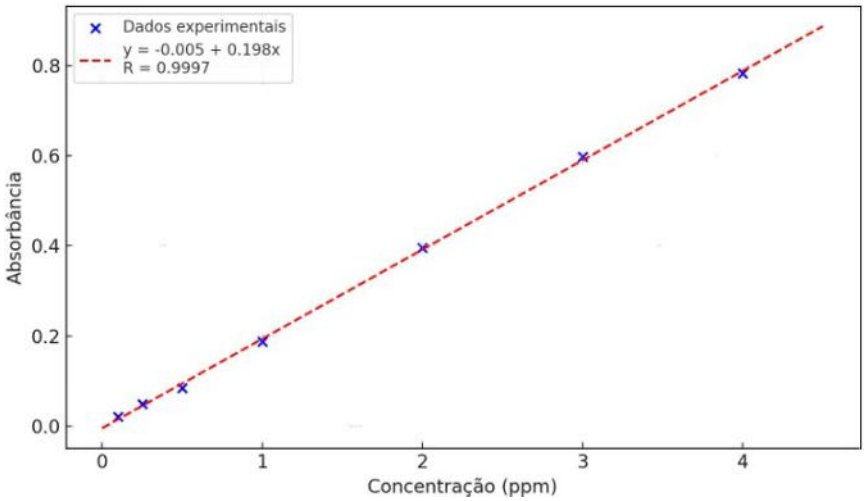
Portanto, os resultados indicam que o carvão ativado produzido a partir de borra de café foi eficaz na remoção de impurezas visuais da água, reduzindo 96,15% de turbidez e 84,90% de cor, superando os parâmetros compatíveis com padrões de potabilidade para água potável. Seu bom desempenho é visto também na comparação com outros adsorventes de origem natural ou residual, como o utilizado por Sousdaleff (2024), que demonstrou altas taxas de redução de cor, entre 61,9% e 94,4%, e eficiência na redução de turbidez, variando de 49% a 92,2%. Além disso, a estabilidade observada na água de lavagem reforça a escolha do ácido fosfórico como agente ativante mais adequado neste contexto.

3.4 Avaliação quantitativa do adsorvente para remoção de cor

Após entender a capacidade do adsorvente de carvão ativado a partir de borra de café para remoção da coloração do efluente da lagoa, seguiu-se com a avaliação quantitativa de sua eficiência. Para isso, empregaram-se soluções de azul de metileno como adsorvato, permitindo determinar a capacidade de remoção do corante pelo material. O azul de metileno foi escolhido por ser um corante catiônico amplamente utilizado em estudos de adsorção, com propriedades bem conhecidas, alta solubilidade em água e fácil detecção por espectrofotometria. Além disso, sua concentração pode ser rigorosamente controlada, o que permite uma análise quantitativa mais precisa do processo de adsorção.

A curva de calibração (Figura 8) construída com base nas soluções padrão de azul de metileno apresentou uma relação linear entre absorbância e concentração, expressa pela equação de calibração (Equação 8), com coeficiente de correlação de 0,9997, indicando excelente linearidade e precisão da calibração.

Figura 8 – Curva de calibração azul de metileno.



Fonte: Autores, 2025.

$$absorbância = -0,005 + 0,198 \times concentração \quad (8)$$

Foram realizados testes com concentrações mais baixas, porém sem sucesso, pois após a passagem pelo adsorvente os valores de absorbância encontrados estavam muito próximos de zero. A adsorção do corante foi conduzida em sistema de coluna de leito fixo, utilizando 0,6 g de carvão ativado obtido a partir de borra de café. Foram utilizadas soluções com concentrações iniciais de 50 a 70 ppm, em incrementos de 5 ppm. Após a passagem de 10 mL da solução pela coluna, foi determinada a absorbância do efluente, convertida em concentração e calculado o valor de quantidade adsorvida no equilíbrio (Tabela 2).

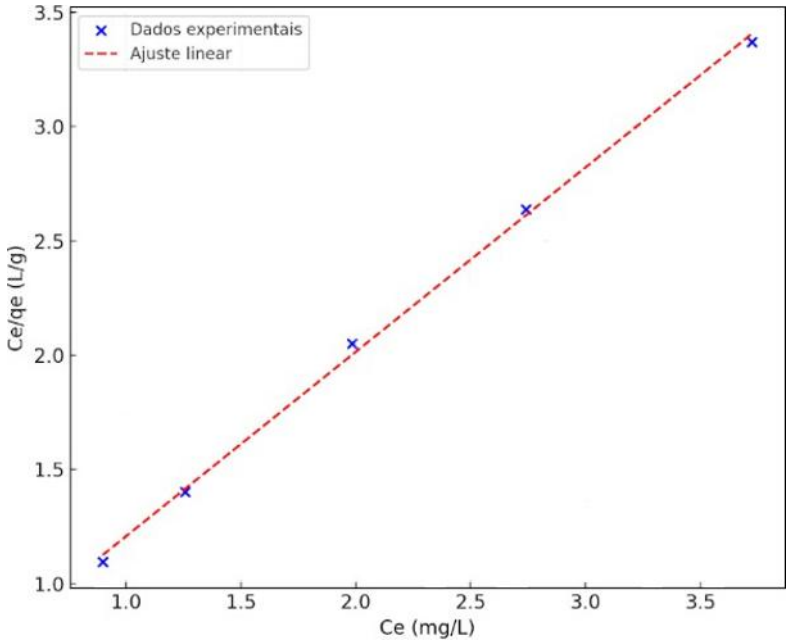
Tabela 2: Resultados dos testes de adsorção.

Concentração Inicial (ppm)	Absorbância	Concentração Final (ppm)	q_e (mg/g)
70	0,733	3,726	1,099
65	0,538	2,732	1,038
60	0,388	1,978	0,950
55	0,244	1,259	0,896
50	0,173	0,898	0,815

Fonte: Autores, 2025.

A partir dos dados experimentais, foi possível ajustar o modelo de Langmuir. Após traçar o gráfico (Figura 9), obteve-se a equação linearizada (Equação 9) e o coeficiente de correlação dos dados.

Figura 9: Modelo de Langmuir



Fonte: Autores, 2025.

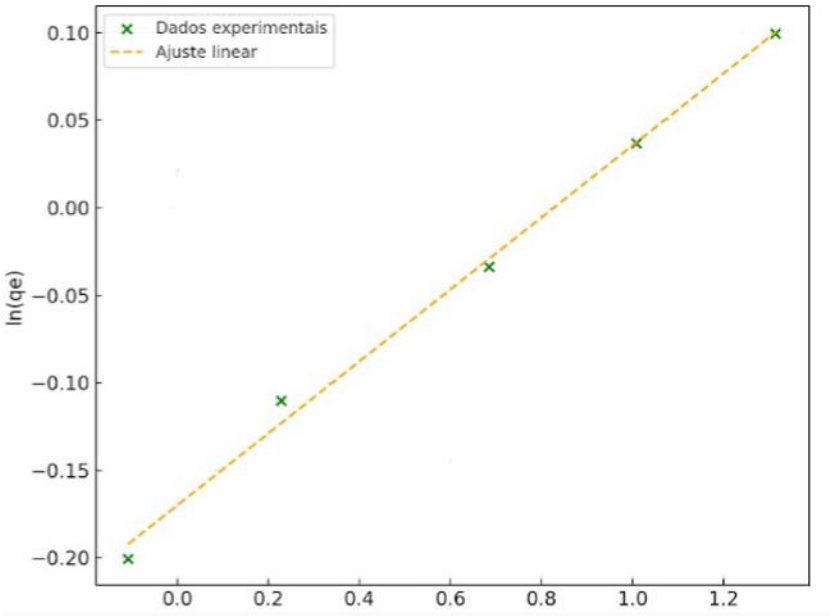
$$\frac{C_e}{q_e} = 0,8070 \bullet C_e + 0,4012 \quad (9)$$

O valor elevado do coeficiente de correlação em 0,9984, indica excelente ajuste do modelo aos dados experimentais, sugerindo que o processo de adsorção tende a seguir um comportamento de formação de monocamada. A alta constante de Langmuir (2,434 L/mg) revela uma forte afinidade entre o corante e os sítios ativos da superfície da borra de café ativada, mesmo sem tratamento térmico adicional após a impregnação química. A capacidade máxima de adsorção de 1,239 mg/g pode ser considerada

satisfatória para um material adsorvente de origem residual e com método de preparo simplificado, reforçando o potencial desse material como alternativa de baixo custo para o tratamento de efluentes contendo corantes catiônicos.

O modelo de Freundlich (Figura 10) também foi testado e a equação linearizada (Equação 10), juntamente com o coeficiente de correlação, foi obtida.

Figura 10: Isoterma de Freundlich



Fonte: Autores, 2025.

$$ln(q_e) = 0,2056 \bullet ln(Ce) - 0,1701 \quad (10)$$

Através da equação em sua forma linearizada é possível obter o coeficiente de determinação igual a 0,9954, confirmando que o modelo de Freundlich representa bem os dados, embora com ajuste ligeiramente inferior ao do modelo de Langmuir. O valor da intensidade de adsorção ou constante de Freundlich (1/n) resultou em 0,205, se o valor de 1/n é menor que 1 a adsorção é favorável (Trana; Youb; Chaob, 2016), sendo consistente com o comportamento esperado para sistemas onde o adsorvato tem alta afinidade pelo adsorvente.

A análise comparativa entre os modelos revela que ambos fornecem excelente correlação com os dados. No entanto, o modelo de Langmuir apresentou um coeficiente de determinação levemente superior, isso sugere que, no intervalo de concentrações estudado (50–70 ppm), a adsorção tende a ser controlada por processos de saturação superficial uniforme, típicos de uma monocamada, embora

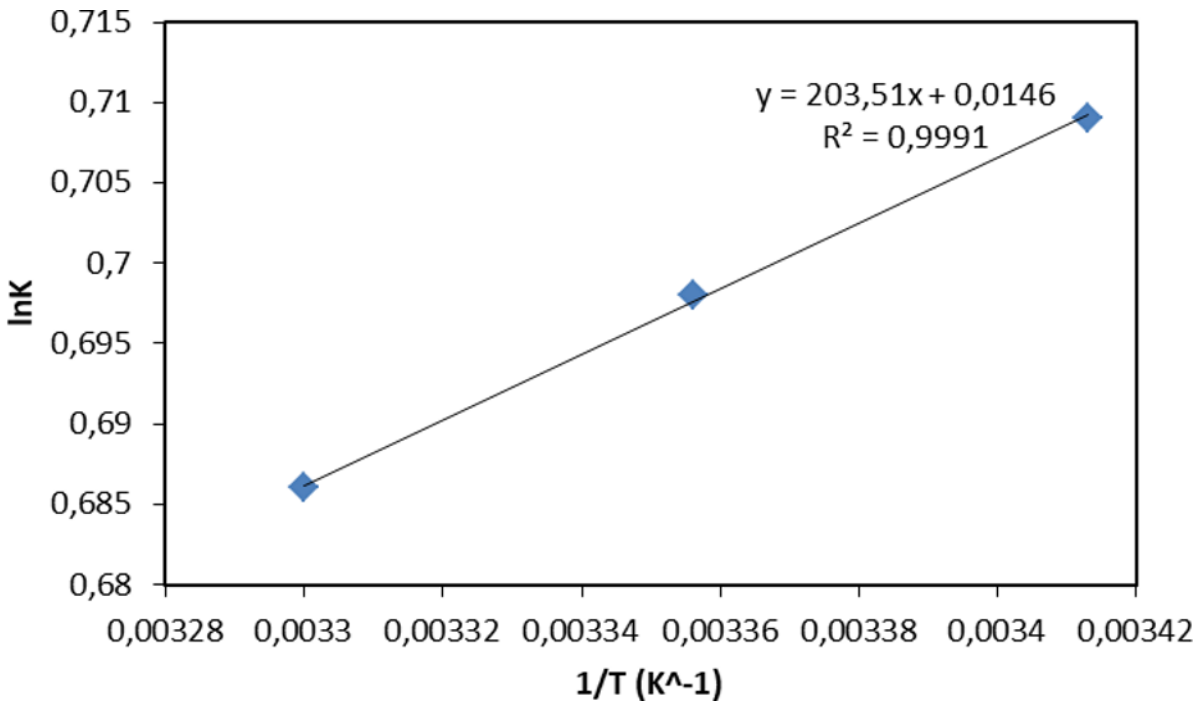
a superfície real do adsorvente — por ser de origem lignocelulósica e não ter sido tratada termicamente após ativação — possua heterogeneidade significativa.

Adicionalmente, o fato de ambos os modelos apresentarem ajustes excelentes reforça que o processo de adsorção envolve tanto interações com sítios homogêneos quanto aspectos heterogêneos e potencialmente multilaminares em determinadas condições. Essa dualidade de comportamento é comum em materiais naturais ou de origem residual e demonstra a complexidade e versatilidade do carvão ativado de borra de café como adsorvente, sobretudo em aplicações ambientais.

3.5 Análise termodinâmica

A análise termodinâmica da adsorção foi realizada com base na constante de Langmuir (K_L) obtida em diferentes temperaturas. Considerando-se que K_L , expressa em L/mg, representa a afinidade do adsorvente pelo adsorvato, essa constante foi utilizada como uma estimativa da constante de equilíbrio termodinâmico $K_{C'}$, (Tran; Bonilla-Petriciolet 2022). Com os valores de K_L obtidos para cada temperatura, calculou-se $\ln K_L \approx \ln K_c$, e estes foram plotados em função do inverso da temperatura absoluta $(1/T)$, gerando o gráfico linear da figura 11.

Figura 11: Variação de lnK em função de 1/T



Fonte: Autores, 2025.

A partir do gráfico de van't Hoff construído com os valores das constantes de Langmuir (K□) obtidas a 293, 298 e 303 K, foi possível estimar os parâmetros termodinâmicos do processo de adsorção. A energia livre de Gibbs negativa ($\Delta G^\circ = -1{,}73$ kJ/mol) em todas as temperaturas indica que o processo é espontâneo. O valor negativo da entalpia ($\Delta H° = -1{,}69$ kJ/mol) confirma que a adsorção é exotérmica. Além disso, a entropia positiva ($\Delta S° = +0{,}12$ J/mol·K) sugere um leve aumento na desordem da interface sólido-líquido, possivelmente devido à liberação de moléculas de água durante a adsorção do corante sobre a borra de café ativada. Resultados semelhantes foram observados por (Gürsoy et al., 2022), que relataram comportamento exotérmico ($\Delta H° = -16{,}4$ kJ/mol) e espontâneo ($\Delta G° < 0$) na adsorção de azul de metileno utilizando um biocompósito de borra de café e alginato.

Esses resultados indicam que a borra de café apresenta potencial como adsorvente de baixo custo, com comportamento típico de adsorção física, de baixa energia, e com estabilidade no intervalo de temperaturas analisado.

4 CONCLUSÃO

A produção de carvão ativado a partir de borra de café, utilizando ativação química com H_3PO_4, demonstrou resultados técnicos promissores para aplicação em sistemas de adsorção voltados ao tratamento de águas contaminadas. A análise granulométrica revelou uma distribuição de partículas concentrada em faixas finas, com cerca de 75% da massa abaixo de 841 µm, indicando um material com boa uniformidade, como evidenciado pelo elevado coeficiente de correlação (R^2) do modelo RRB aplicado à distribuição de tamanho de partículas.

Nos ensaios de purificação, o carvão ativado foi capaz de reduzir os parâmetros visuais da água (turbidez e cor) de forma substancial. Após cinco ciclos de tratamento, os valores atingidos —2 FAU para turbidez e 11,7 Hz para cor — ficaram dentro dos limites estabelecidos para potabilidade visual, demonstrando a eficiência do adsorvente na remoção de impurezas.

Os testes com azul de metileno indicaram excelente desempenho do carvão ativado em sistema de leito fixo. O modelo de Langmuir apresentou forte correlação com os dados experimentais ($R^2 = 0{,}9984$), indicando um processo de adsorção compatível com formação de monocamada, com capacidade máxima de adsorção de 1,239 mg/g. O modelo de Freundlich também apresentou bom ajuste ($R^2 = 0{,}9954$), sugerindo que a superfície do material, embora majoritariamente homogênea, apresenta alguma heterogeneidade, característica comum em materiais de origem residual. A energia

livre de Gibbs negativa ($\Delta G° = -1,73$ kJ/mol) indica que o processo é espontâneo, não dependendo de uma energia ativação.

Portanto, os resultados validam o uso do carvão ativado de borra de café como uma alternativa técnica e ambientalmente viável para o tratamento de águas residuais, com uma elevada eficiência de adsorção e processo de produção sustentável.

REFERÊNCIAS

ATKINS, Peter; DE PAULA, Julio. Físico-química: volume 1. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

BABEL, S.; KURNIAWAN, T. A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. Journal of Hazardous Materials, v. 97, n. 1-3, p. 219-243, 2003.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 84, p. 94-100, 5 maio 2021.

FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. Chemical Engineering Journal, v. 156, n. 1, p. 2-10, 2010.

GÜRSOY, M.; DEMİR, S.; ÖZTÜRK, N. Removal of methylene blue from aqueous solutions by using spent coffee ground–sodium alginate biocomposite. Environmental Science and Pollution Research, v. 29, p. 13151–13162, 2022.

MAIA, Roberto G.; DA SILVA, Karina S.; MARAGON, Leticia S.; ARÁUJO, Fernanda P. da S.; SOARES, Luana T. M.; DE SOUSA, Rita de C. S.; FARIA, Wagner L. da S.; SANTANA, Rejane de C. USO DE ATIVADORES COM POTÁSSIO PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

ATIVADO: UMA REVISÃO. São José dos Pinhais: Contribuciones A Las Ciencias Sociales, 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/385801104_Uso_de_ativadores_com_potassio_para_prod ucao_de_carvao_vegetal_ativado_uma_revisao. Acesso em: 01 jun. 2025.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 256 p.

SANTANA, Caio Nunes; CARVALHO, Luciene Santos. COMPARAÇÃO DO USO DE DISTINTOS ATIVANTES QUÍMICOS NA OBTENÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA BORRA DO CAFÉ DE CÁPSULAS.. In: . Disponível em: https//www.even3.com.br/anais/iv-congresso-de-pesquisa-pos-graduacao-e-inovacao-351904/71206 0-COMPARACAO-DO-USO-DE-DISTINTOS-ATIVANTES-QUIMICOS-NA-OBTENCAO-DE-CARVAO-ATIVADO-A-PARTIR-DA-BORRA-DO-CAFE-DE-CAPS. Acesso em: 01/06/2025.

SOUSDALEFF, Martha. Estudo do biochar de borra de café no tratamento do lixiviado do aterro sanitário de Campo Mourão. 2024. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Inovações Tecnológicas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2024. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/35473. Acesso em: 01 jun. 2025.

TRAN, H. N.; BONILLA-PETRICIOLET, A. Improper Estimation of Thermodynamic Parameters in Adsorption Studies with Distribution Coefficient KD (qe/Ce) or Freundlich Constant (KF): Considerations from the Derivation of Dimensionless Thermodynamic Equilibrium Constant and Suggestions. Journal of Chemistry, 2022.

TRANA, H. N.; YOUB, S. J.; CHAOB, H. P. Thermodynamic parameters of cadmium adsorption onto orange peel calculated from various methods: A comparison study. 2016, pp. 2678-2679.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

BABEL, S.; KURNIAWAN, T. A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. Journal of Hazardous Materials, v. 97, n. 1-3, p. 219-243, 2003.

FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. Chemical Engineering Journal, v. 156, n. 1, p. 2-10, 2010.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 256 p.

SANTANA, Caio Nunes; CARVALHO, Luciene Santos. COMPARAÇÃO DO USO DE DISTINTOS ATIVANTES QUÍMICOS NA OBTENÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA BORRA DO CAFÉ DE CÁPSULAS.. In: . Disponível em: https//www.even3.com.br/anais/iv-congresso-de-pesquisa-pos-graduacao-e-inovacao-351904/71206 0-COMPARACAO-DO-USO-DE-DISTINTOS-ATIVANTES-QUIMICOS-NA-OBTENCAO-DE-CARVAO-ATIVADO-A-PARTIR-DA-BORRA-DO-CAFE-DE-CAPS. Acesso em: 01/06/2025.

SOUSDALEFF, Martha. Estudo do biochar de borra de café no tratamento do lixiviado do aterro sanitário de Campo Mourão. 2024. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Inovações Tecnológicas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2024. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/35473. Acesso em: 01 jun. 2025.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

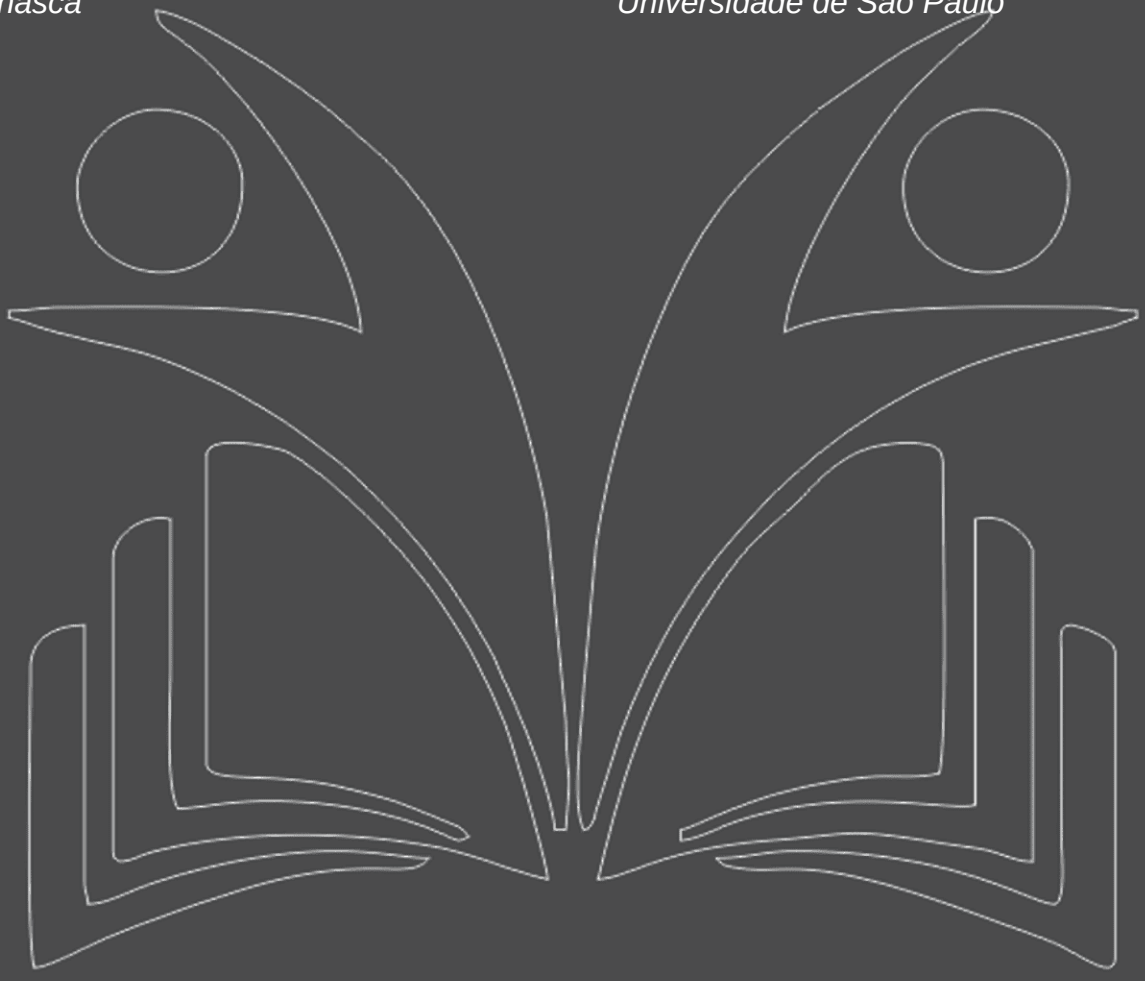
Capítulo 17

10.37423/260911410

USO DOS GÊMEOS DIGITAIS APLICADOS NO SETOR PORTUÁRIO NO BRASIL

Agustin Enrique Cuevas Fernandez — *Universidade de São Paulo*

Carlos Cugnasca — *Universidade de São Paulo*



RESUMO

Este estudo analisa a aplicação de Gêmeos Digitais no setor portuário brasileiro, abordando a sua evolução conceitual, experiências internacionais e desafios para a sua adoção no contexto nacional. A pesquisa propõe uma estrutura tecnológica baseada na integração de sensores conectados, sistemas de informação, análise de dados e modelos preditivos, com o objetivo de apoiar a tomada de decisão e aumentar a eficiência operacional. A metodologia adotada caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, de natureza exploratória, fundamentada em revisão bibliográfica e análise documental, complementada por um estudo de caso em um porto brasileiro de médio porte. Os resultados indicam que, embora a adoção de gêmeos digitais no Brasil ainda seja incipiente — principalmente devido à baixa integração entre sistemas e à limitada capacitação técnica —, a tecnologia apresenta elevado potencial para ganhos em eficiência, previsibilidade operacional e sustentabilidade ambiental. Conclui-se que os Gêmeos Digitais constituem um recurso estratégico para a logística nacional e a modernização do setor portuário nacional, cuja consolidação depende do fortalecimento de políticas públicas, investimentos em infraestrutura digital e cooperação entre instituições públicas e privadas.

Palavras-Chaves: Gêmeos Digitais, Setor Portuário, Logística Portuária, Indústria 4.0, Eficiência Operacional.

1 INTRODUÇÃO

O setor portuário desempenha papel central na economia brasileira, sendo responsável por parcela significativa do escoamento de cargas e do comércio exterior. Constitui um pilar estratégico da logística global e do comércio internacional, dada sua função na movimentação de grandes volumes de mercadorias e na integração intermodal das cadeias de suprimentos. Diante da crescente complexidade das operações portuárias, intensifica-se a demanda por instrumentos tecnológicos que favoreçam a gestão eficiente, a segurança operacional e a sustentabilidade ambiental. As exigências por maior eficiência, segurança e sustentabilidade têm impulsionado a adoção de tecnologias digitais avançadas, entre as quais se destaca a tecnologia de Digital Twins, ou Gêmeos Digitais (DTs), capaz de integrar dados em tempo real, modelos de simulação e análises preditivas, conforme Madusanka et al. (2023).

A implementação dessa tecnologia possibilita o monitoramento contínuo, a simulação de cenários e a otimização antecipada de processos, desde o planejamento da alocação de cargas até a manutenção preditiva de ativos críticos, como demonstram Rudskoy et al. (2020) e González-Cancelas et al. (2025). Embora sua adoção no Brasil ainda seja incipiente, estudos como o de Zheng et al. (2019) apontam desafios relacionados à interoperabilidade, capacitação técnica e padronização de dados, ao mesmo tempo em que evidenciam seu potencial para elevar a competitividade e reduzir custos operacionais.

Dessa forma, os Gêmeos Digitais configuram-se como instrumento estratégico para fortalecer a tomada de decisão e promover a modernização logística no país. As evidências da literatura indicam que sua consolidação dependerá da evolução das políticas públicas, do investimento em infraestrutura digital e da cooperação entre os setores acadêmico, governamental e privado.

O setor portuário brasileiro enfrenta desafios relacionados à elevada complexidade operacional, congestionamentos, variabilidade da demanda, exigências de sustentabilidade, qualificação da mão de obra, segurança e limitações na integração tecnológica da cadeia logística. Problemas como lentidão na alocação de navios, subutilização de equipamentos e falhas nas interfaces intermodais comprometem a eficiência e elevam custos. Fatores ambientais, como eventos extremos e variações hidrodinâmicas, ampliam a necessidade de capacidade preditiva e resiliência. Nesse contexto, a tecnologia de Gêmeos Digitais destaca-se ao possibilitar simulações de cenários, monitoramento em tempo real e suporte analítico à decisão, com aplicações em otimização de fluxos, manutenção preditiva, integração logística sustentável e avaliação antecipada de investimentos.

O objetivo deste estudo é investigar a aplicabilidade e o grau de adoção dos Gêmeos Digitais no setor portuário brasileiro, identificando problemas mitigáveis, benefícios potenciais e lacunas que dificultam sua adoção em larga escala. Para isso, definem-se objetivos específicos como mapear desafios sistêmicos e operacionais abordáveis por essa tecnologia; avaliar métodos, arquiteturas de integração de dados, técnicas de simulação e algoritmos preditivos; identificar barreiras técnicas, organizacionais e regulatórias; e propor um framework estratégico.

A modernização do setor portuário brasileiro permanece limitada por gargalos operacionais, integração tecnológica insuficiente e ausência de mecanismos preditivos de apoio à decisão. Nesse cenário, os Gêmeos Digitais configuram-se como alternativa estratégica para ampliar eficiência, reduzir custos, fortalecer a sustentabilidade e elevar a competitividade nacional.

A investigação adotou abordagem qualitativa e exploratória, estruturada em revisão sistemática da literatura e estudo de casos múltiplos. A revisão mapeou o estado da arte entre 2018 e 2025, analisando arquiteturas de digitalização, integração de sensores, métodos de simulação, algoritmos preditivos e resultados de eficiência operacional. A triangulação dos achados permitiu consolidar o conhecimento disponível, avaliar o impacto potencial no contexto nacional e identificar lacunas relevantes para pesquisas futuras.

A implementação de DTs em terminais portuários brasileiros proposta será composta por quatro fases que abordam desafios operacionais, estratégicos e tecnológicos.

A primeira fase, de aquisição, pré-processamento e integração de dados, foca na convergência de fontes heterogêneas para alimentar o modelo virtual. Serão integrados dados de sensores da Internet das Coisas (IoT) e sistemas de rastreamento, informações de sistemas legados (AIS e TOS/COS) e dados geoespaciais de satélite e layout para formar uma arquitetura de dados robusta, com qualidade, interoperabilidade e baixa latência.

A segunda fase, de modelagem digital, envolve a criação da réplica virtual do terminal, representando infraestrutura, ativos dinâmicos e fluxos logísticos.

Na fase de análise preditiva e otimização, o DT atuará como laboratório virtual. Serão aplicados algoritmos de Machine Learning e heurísticas de otimização para alocar recursos, programar operações críticas (movimentação de cargas, berthing) e apoiar a manutenção preditiva, ampliando o throughput.

A fase final envolve validação, avaliação de desempenho e iteração contínua. O sistema será testado por indicadores de gestão (KPIs) do setor, simulações de estresse e feedback de operadores. Essa etapa assegura confiabilidade, suporte efetivo à decisão e ajustes sucessivos que fortalecem eficiência, resiliência e sustentabilidade dos terminais.

O artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a revisão da literatura; a Seção 3 descreve a metodologia; a Seção 4 discute os resultados e o estudo de caso; e a Seção 5 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Transformação Digital e Indústria 4.0 na Logística Portuária

A crescente complexidade das cadeias logísticas globais e a intensificação da concorrência entre portos têm impulsionado a adoção de tecnologias digitais voltadas à melhoria do desempenho operacional e à integração entre sistemas. Nesse contexto, a transformação digital tem desempenhado papel central na evolução dos sistemas logísticos, promovendo maior conectividade, automação e capacidade analítica em ambientes operacionais complexos (Razmjooei et al., 2023).

No setor portuário, tais transformações se materializam no conceito de Smart Ports, caracterizado pela incorporação de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), análise avançada de dados, inteligência artificial e integração entre sistemas corporativos e operacionais. A digitalização progressiva dos processos portuários tem permitido maior visibilidade dos fluxos logísticos, melhor coordenação entre agentes e maior eficiência na utilização de recursos (Neugebauer et al., 2024).

Além disso, a adoção de sistemas operacionais integrados, especialmente Terminal Operating Systems (TOS), consolidou-se como elemento estruturante das operações portuárias contemporâneas. Esses sistemas viabilizam a coordenação de atividades complexas envolvendo múltiplos recursos e processos interdependentes, ao mesmo tempo em que geram volumes crescentes de dados operacionais.

2.2 Fundamentos do Digital Twin

O conceito de Digital Twin, ou Gêmeos Digitais (DTs) emerge no contexto da transformação digital associada à Indústria 4.0, consolidando-se como uma das abordagens mais promissoras para

integração entre sistemas físicos e digitais em ambientes complexos. Originalmente proposto por (Grieves, 2014), no âmbito da gestão do ciclo de vida de produtos (Product Lifecycle Management – PLM), o conceito evoluiu significativamente com o avanço das tecnologias de conectividade e análise de dados.

De forma geral, os DTs podem ser compreendidos como uma representação virtual dinâmica de um sistema físico continuamente atualizada por fluxos bidirecionais de dados (Neugebauer et al., 2024). Diferentemente de modelos digitais estáticos, incorpora dados operacionais em tempo real, permitindo monitoramento, simulação e previsão.

A literatura converge na identificação de três elementos fundamentais do DT; 1) a entidade física, 2) sua representação virtual e 3) o fluxo contínuo de dados entre ambas (Neugebauer et al., 2024). Tal integração viabiliza análises preditivas e prescritivas, ampliando o suporte à tomada de decisão em ambientes operacionais complexos.

2.3 Arquiteturas e Classificações de Digital Twins (DTs)

O avanço do conceito tem sido acompanhado pelo desenvolvimento de diferentes propostas arquiteturais e classificatórias. Em termos gerais, as arquiteturas convergem para estruturas baseadas em camadas interdependentes que integram sistemas físicos e virtuais por meio de infraestrutura digital (Anwar et al., 2019).

No contexto portuário, a camada física abrange equipamentos operacionais e infraestrutura; a camada de dados inclui sensores, IoT e TOS; a camada analítica incorpora simulação e algoritmos de otimização; e a camada de aplicação contempla interfaces e suporte à decisão (Haag et al., 2018).

Em termos classificatórios, destacam-se abordagens baseadas em maturidade funcional e escopo de aplicação. Observa-se evolução desde monitoramento descritivo até aplicações autônomas, bem como distinções entre DTs de componente, sistema e processo (Klar et al., 2023).

2.4 Aplicações de Digital Twins na Logística e em Portos

A adoção de DTs em diferentes setores tem evidenciado seu potencial como ferramenta estratégica para suporte à decisão em ambientes complexos. Inicialmente difundido na manufatura, o conceito foi progressivamente incorporado à logística e às operações portuárias (Neugebauer et al., 2024).

Na logística, aplicações incluem simulação de redes, previsão de demanda e planejamento de transporte (Jones et al., 2020). No contexto portuário, destacam-se aplicações voltadas à otimização de pátio, coordenação de equipamentos e planejamento de atracações (Madusanka et al., 2023).

Apesar dos avanços, muitos estudos permanecem em nível conceitual ou experimental, com limitada validação empírica em ambientes reais.

2.5 Limitações e Lacunas da Literatura

Embora a literatura tenha crescido significativamente, persistem limitações relevantes, especialmente no que se refere à aplicação em ambientes operacionais complexos como terminais portuários. Grande parte dos estudos concentra-se na manufatura, restringindo a generalização para contextos logísticos caracterizados por elevada variabilidade operacional (Galkin et al., 2025).

Observa-se ainda limitada evidência empírica em ambientes reais e escassez de estudos sobre integração entre DTs e sistemas existentes, especialmente TOS. Além disso, a maior parte das evidências concentra-se em portos europeus e asiáticos, havendo lacunas relevantes no contexto latino-americano.

2.6 Modelo Teórico Adotado no Estudo

Com base na discussão apresentada, este estudo adota um modelo teórico que compreende o DT como mecanismo integrador voltado à melhoria do desempenho operacional em terminais portuários. O construto é operacionalizado a partir de três dimensões principais; 1) integração de dados em tempo quase real, 2) capacidade analítica e 3) suporte à decisão.

O modelo propõe que a adoção de DTs contribui para melhorias em eficiência operacional, previsibilidade e produtividade, sendo essas relações moderadas por fatores contextuais como maturidade digital, infraestrutura tecnológica, qualidade dos dados e características organizacionais.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A aplicação de DTs no setor portuário envolve quatro tipologias de desafios: operacionais, infraestrutura e planejamento, ambientais e sustentabilidade e organizacionais e integração

tecnológica. Essa classificação, amplamente discutida na literatura recente, permite compreender o caráter multidimensional e estratégico da tecnologia.

Os desafios operacionais tratam da otimização tática em tempo real, incluindo alocação dinâmica de berços (Uhlemann et al., 2017), agendamento de guindastes (Rudskoy et al., 2020) e coordenação de ativos móveis (González-Cancelas et al., 2025). Destaca-se também a manutenção preditiva, com antecipação de falhas e detecção de anomalias (Semeraro et al., 2021). Essas aplicações reduzem dwell time e elevam o throughput dos terminais.

Os desafios de infraestrutura e planejamento abrangem decisões de médio e longo prazo, como expansão de terminais e avaliação de investimentos. Os DTs apoiam modelagem multi-fidelidade (Wright et al., 2020), análise de risco em projetos (Galkin et al., 2025) e comissionamento virtual de sistemas automatizados (Haar et al., 2026), reduzindo incertezas e custos.

A dimensão ambiental e de sustentabilidade está ligada ao cumprimento de metas ESG. DTs otimizam o uso de shore power (Gazzaneo et al., 2025), reduzem consumo de combustível em manobras (Kritzinger et al., 2018), monitoram indicadores ambientais (Gazzaneo et al., 2025) e simulam impactos climáticos extremos (Haar et al., 2026). Assim, tornam-se ferramentas centrais para portos inteligentes e resilientes.

Os desafios organizacionais e de integração tecnológica incluem interoperabilidade de sistemas (Yao et al., 2021), padronização de dados (Le et al., 2023) e adoção de arquiteturas de microsserviços (Zocco et al., 2023). Barreiras institucionais e de capacitação também influenciam a adoção (Zheng et al., 2019), assim como riscos de governança de dados (Jones et al., 2020).

O conceito de Gêmeos Digitais consolidou-se como inovação central da Indústria 4.0, permitindo representar virtualmente, em tempo real, objetos, processos e sistemas físicos (Madusanka et al., 2023). Essa integração contínua entre domínios físico e digital depende de IoT, IA, Machine Learning e computação em nuvem, que viabilizam análises de grandes volumes de dados com baixa latência (Uhlemann et al., 2017). Diferentemente de simulações estáticas, os DTs utilizam ciclos permanentes de retroalimentação, assegurando sincronização com sensores e sistemas físicos para monitoramento, previsão de falhas e otimização operacional (Semeraro et al., 2021).

No setor portuário, os DTs expandiram seu escopo ao possibilitar otimização de atracações, fluxos logísticos, consumo energético e planejamento de infraestrutura (Le et al., 2023). O ciclo de vida do

DT acompanha todo o sistema físico, do projeto à desativação (Du et al., 2023) (Tzachor et al., 2022), favorecendo decisões baseadas em cenários simulados, além de integrar subsistemas por meio de plataformas unificadas (Razmjooei et al., 2023). O avanço de padrões de interoperabilidade e do modelo Digital Twin-as-a-Service (DT-as-a-Service) reforça sua escalabilidade (Le et al., 2023) (Zocco et al., 2023).

Ainda assim, persistem desafios técnicos e institucionais, incluindo heterogeneidade de dados (Jones et al., 2020), governança e privacidade e limitações organizacionais (Zheng et al., 2019). A manutenção preditiva é fortalecida por IA e redes neurais (Razmjooei et al., 2023), enquanto sensores ambientais permitem avaliar emissões e eficiência energética (Kritzinger et al., 2018) (Wright et al., 2020). Em contextos emergentes, a adoção enfrenta restrições de infraestrutura, maturidade digital e integração sistêmica (Zheng et al., 2019) (Galkin et al., 2025). A taxonomia resultante — operacional, infraestrutura/planejamento, ambiental e organizacional — constitui o arcabouço central para análises e aplicações futuras. A Tabela 1 apresenta a estrutura de classificação taxonômica.

Tabela 1 – Classificação taxonômica da tipologia

Eixo	**Nível de Intervenção**	**Foco Principal**	**Valor Agregado (Acadêmico)**
Eixo 1 - Operacional	Tático (Curto Prazo)	Eficiência e Manutenção em Tempo Real	Maximização do *Throughput* e Confiabilidade de Ativos
Eixo 2 - Infraestrutura e Planejamento	Estratégico (Longo Prazo)	Decisões de Capital e Expansão	Redução do Risco de Investimento e Modelagem de Cenários
Eixo 3 - Ambiental e Sustentabilidade	Tático/Estratégico (ESG)	Monitoramento e Mitigação de Impactos	Conformidade Regulatória e Resiliência Climática
Eixo 4 - Organizacional e Integração	Institucional/Tecnológico	Governança, Padrões e Interoperabilidade	Escalabilidade da Solução e Adoção Institucional

Fonte: Produção dos próprios autores (2026)

Os pré-requisitos para DTs abrangem infraestrutura de dados e fusão de informações heterogêneas (Jones et al., 2020), padronização e interoperabilidade semântica (Yao et al., 2021), computação híbrida em nuvem e borda (Thelen et al., 2022) e modelagem de alta fidelidade com BIM e CAD (Hakimi et al., 2024). Governança robusta, políticas de segurança e maturidade organizacional são igualmente essenciais (Anwar et al., 2019). A definição clara de objetivos e KPIs reforça o valor decisório dos modelos (Haag et al., 2018), enquanto ecossistemas colaborativos e plataformas abertas impulsionam redes interportos (Thelen et al., 2022).

Por fim, os recursos necessários incluem infraestrutura digital, conectividade avançada (Anwar et al., 2019), escalabilidade computacional (Kritzinger et al., 2018) e dados confiáveis (Jones et al., 2020). A integração de IA potencializa previsões logísticas (Razmjooei et al., 2023). Competências humanas, governança e investimento estratégico sustentam a adoção (Galkin et al., 2025). Assim, DTs tornam-se pilares de eficiência, sustentabilidade e resiliência nas cadeias portuárias, consolidando uma ponte inteligente entre o físico e o digital (Semeraro et al., 2021).

4 METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, de natureza exploratória. A metodologia adotada baseia-se em revisão bibliográfica de artigos científicos, relatórios técnicos e documentos institucionais relacionados à aplicação de gêmeos digitais no setor portuário, além de análise documental de dados públicos.

Adicionalmente, foi realizado um estudo de caso em um porto brasileiro de médio porte, com o objetivo de avaliar a viabilidade da aplicação de gêmeos digitais em um contexto real. A escolha do setor portuário justifica-se por sua relevância econômica e pelo potencial de ganhos operacionais proporcionados pela digitalização.

A implantação de Gêmeos Digitais em portos exige um processo iterativo que integra planejamento estratégico, governança de dados e gestão do ciclo de vida do sistema. A execução deve ser gradual, validando conceitos e garantindo interoperabilidade entre componentes físicos e digitais (Neugebauer et al., 2024).

A fase 1, de concepção estratégica, define objetivos, escopo e requisitos do DT, incluindo funções críticas, KPIs e ativos a representar (Haag et al., 2018). Essa clareza inicial sustenta modelos escaláveis como DT-as-a-Service (Razmjooei et al., 2023).

A fase 2, de integração e governança de dados, consolida a base informacional por meio de mapeamento e fusão de dados heterogêneos (sensores IoT, AIS, meteorologia) (Jones et al., 2020), uso de ontologias e padrões para interoperabilidade (Yao et al., 2021) e protocolos de qualidade e confiabilidade.

Na fase 3, de modelagem e arquitetura, constrói-se o modelo digital utilizando arquiteturas modulares (Hakimi et al., 2024), além de ferramentas BIM e CAD para representar aspectos físicos e funcionais (Anwar et al., 2019).

A fase 4, de sincronização e validação, conecta o DT ao sistema físico com transmissão contínua de dados. Tecnologias como 5G, edge computing e IA distribuída reduzem a latência (Thelen et al., 2022). Testes operacionais calibram o modelo com base em métricas de acurácia e confiabilidade (Klar et al., 2023).

A fase 5 libera o potencial analítico do DT, aplicando modelos de previsão para manutenção (Semeraro et al., 2021) e demanda logística (Razmjooei et al., 2023), além de simulação de cenários para decisões estratégicas (Wright et al., 2020). Dashboards apoiam tomada de decisão em tempo real (Haag et al., 2018).

A fase 6 estabelece a operação contínua por meio de ciclos permanentes de retroalimentação (Du et al., 2023), programas de capacitação e uso de RA (Homayouni et al., 2025), além de mecanismos robustos de governança e cibersegurança (Tzachor et al., 2022).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da literatura e do estudo de caso evidencia que a aplicação de gêmeos digitais no setor portuário pode proporcionar melhorias significativas na previsibilidade operacional, na gestão de ativos e na redução de custos. Observou-se que a integração de sensores e sistemas de informação permite o monitoramento contínuo das operações, possibilitando a identificação antecipada de falhas e gargalos.

No curto prazo, destacam-se melhorias de eficiência, previsibilidade e controle operacional em tempo real. Plataformas DT-as-a-Service integram dados náuticos, sensores IoT e vigilância, elevando a coordenação operacional (Razmjooei et al., 2023). O monitoramento contínuo de equipamentos viabiliza manutenção preditiva e redução de paradas (Homayouni, et al., 2025), enquanto técnicas de Machine Learning otimizam a produtividade (Semeraro et al., 2021). A simulação integrada melhora fluxos entre pátio e berço (Haag et al., 2018) e reduz o vessel dwell time. Em segurança e sustentabilidade, os DTs antecipam riscos marítimos (Grieves, 2014) e apoiam controle energético e emissões (Gazzaneo et al., 2025).

No longo prazo, os DTs influenciam decisões de capital, resiliência climática e integração sistêmica. Modelos multifidelidade embasam investimentos em infraestrutura (Wright et al., 2020). Simulações climáticas fortalecem a adaptação a eventos extremos (Gazzaneo et al., 2025) e apoiam metas de descarbonização (Kritzinger et al., 2018). A padronização e interoperabilidade possibilitam redes digitais interportuárias (Yao et al., 2021), enquanto ciclos contínuos de retroalimentação criam sistemas cognitivos portuários (Thelen et al., 2022). Assim, os DTs evoluem de ganhos operacionais a motores de transformação da gestão (Galkin et al., 2025).

Em países emergentes, a fragmentação institucional exige capacitação, modernização informacional e marcos de interoperabilidade (Zheng et al., 2019). A integração entre DTs e Port Community Systems demanda coordenação entre governo e operadores, permitindo redes interportuárias orientadas a dados (Thelen et al., 2022).

Os DTs também apoiam políticas climáticas, estratégias de portos verdes (Gazzaneo, et al., 2025) e decisões baseadas em simulação e evidências, fortalecendo a competitividade e o planejamento público (Galkin et al., 2025). Assim, portos passam a atuar como nós cognitivos de redes digitais globais (Madusanka et al., 2023) (Neugebauer et al., 2024), exigindo políticas que garantam interoperabilidade, segurança e acesso equitativo.

5.1 Passos seguintes após a implantação

Após criar o modelo virtual e integrar as fontes principais de dados, inicia-se a fase de pós-implantação, dedicada ao aperfeiçoamento e expansão do ecossistema digital. Essa etapa transforma o gêmeo em um sistema dinâmico, capaz de aprendizado, adaptação e suporte inteligente à decisão. Em portos, a maturidade do DT depende da integração contínua de dados, interoperabilidade e novas camadas analíticas de IA e aprendizado de máquina (Madusanka et al., 2023), permitindo a transição de modelos descritivos para capacidades preditivas e prescritivas. Portos que avançam nesse estágio alcançam maior eficiência e sustentabilidade (Neugebauer et al., 2024), reforçando o caráter estratégico dos DTs na inovação e competitividade do setor.

A pós-implantação envolve calibração do modelo e validação por KPIs (Du et al., 2023), seguida pela expansão da interoperabilidade e padronização semântica (Yao et al., 2021). Em seguida, algoritmos de Machine Learning refinam previsões e operações (Semeraro et al., 2021), enquanto arquiteturas em borda e nuvem sustentam escalabilidade e baixa latência (Bari et al., 2024). Estudos destacam,

ainda, a análise de retorno sobre investimento (Galkin, et al., 2025) e a formação de redes interportuárias (Neugebauer et al., 2024). Governança, privacidade e cibersegurança tornam-se eixos estruturantes (Yao et al., 2021). Assim, a pós-implantação inaugura um ciclo permanente de aprendizado e otimização, consolidando os DTs como pilares da transformação digital dos portos.

A evolução dos DTs exige um ecossistema tecnológico integrado. A fusão de dados oriundos de IoT, AIS e satélites garantem representações atualizadas (Jones et al., 2020), enquanto conectividade avançada e computação em nuvem/borda asseguram processamento contínuo (Thelen et al., 2022). IA e aprendizado de máquina sustentam análises preditivas (Razmjooei et al., 2023), e ferramentas imersivas apoiam treinamento e manutenção (Homayouni et al., 2025). A interoperabilidade permanece essencial (Yao et al., 2021).

A eficácia dos gêmeos depende de camadas articuladas: aquisição multissensorial (Jones et al., 2020), arquiteturas híbridas escaláveis (Thelen et al., 2022), modelos preditivos e prescritivos (Wright et al., 2020), transferência de aprendizado (Zocco et al., 2023) e geração de dados sintéticos (Toomeoja et al., 2025). Métodos híbridos de simulação validam cenários operacionais e climáticos (Gazzaneo et al., 2025). BIM, GIS, AR e visualização 3D fortalecem a adoção operacional (Anwar et al., 2019), enquanto automação e robótica integram o DT ao controle físico (Homayouni et al., 2025). Sistemas de energia coordenados via DT reduzem emissões (Gazzaneo et al., 2025). Governança, cibersegurança e privacidade continuam fundamentais (Tzachor et al., 2022), assim como padrões e ontologias (Thelen et al., 2022). A integração com PCS e cadeias logísticas amplia a visibilidade e colaboração interportuária (Klar et al., 2023). Em síntese, a orquestração dessas tecnologias consolida o gêmeo digital como ferramenta estratégica para eficiência, segurança e sustentabilidade (Neugebauer et al., 2024).

5.2 Estudo de caso

Este estudo de caso analisa a aplicação de Gêmeos Digitais no setor portuário brasileiro, a partir da literatura recente e de experiências piloto nacionais. O sistema portuário brasileiro enfrenta desafios estruturais tais como complexidade operacional, gargalos logísticos, infraestrutura limitada e pressões ambientais, que exigem tecnologias que ampliem controle, previsibilidade e eficiência.

A implantação de DTs ocorre em seis fases: (1) concepção e planejamento; (2) integração e governança de dados; (3) modelagem arquitetural; (4) sincronização e validação em tempo real; (5) análise

preditiva e apoio à decisão; e (6) operação contínua e sustentabilidade. Cada etapa demanda alinhamento entre tecnologia, governança e capacitação. A eficácia depende de infraestrutura digital robusta, padrões de dados, interoperabilidade, conectividade avançada (5G, nuvem, edge), políticas de governança e equipes qualificadas.

O ecossistema dos DTs envolve IoT, AIS, satélites, IA, aprendizado de máquina e plataformas DT-as-a-Service, permitindo simulações avançadas, manutenção preditiva e planejamento operacional orientado por dados. Os resultados esperados incluem, no curto prazo, maior eficiência, redução de esperas, melhor alocação de recursos e previsibilidade; e, no médio e longo prazo, suporte estratégico, ganhos ambientais e integração logística.

A adoção nacional requer um marco regulatório de interoperabilidade e governança de dados, além de políticas públicas que promovam redes interportos de DTs e integração com Port Community Systems.

A Tabela 2, contém um cronograma proposto para a implantação dos gêmeos digitais:

Tabela 2 – Cronograma de implantação de gêmeos digitais em um porto

Cronograma de atividades		**Meses**											
Etapa / Atividade	**Descrição**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
Diagnóstico inicial	Levantamento de requisitos, mapeamento e análise												
Plano estratégico	Definição de objetivo do DT e escopo												
Governança e padrões de dados	Criação de políticas de dados e critérios de interoperabilidade												
Infraestrutura digital	Expansão ou instalação de conectividade (5G, fibra), infraestrutura												
Sensoriamento e instrumentação	Instalação de sensores IoT, integração AIS, câmeras												
Integração de sistemas	Conexão com PCS, ERP, criação de APIs e *pipelines* de dados												
Modelagem do gêmeo digital	Construção do modelo virtual do porto: atracação, pátio, *gate*												
Sincronização em tempo real	Implementação de data *streaming*, *dashboards* e testes												
Simulações e cenários	Desenvolvimento de simulações de ocupação de berços, congestionamento, falhas, clima e consumo energético												
Análise preditiva	Aplicação de IA/ML para manutenção preditiva, previsão de filas												

Validação operacional	Testes com operadores, ajustes, validação com KPIs												
Operação contínua e expansão	Entradas em produção, treinamento e integração interportos												

Fonte: Produção dos autores (2026)

Assim, os DTs configuram uma inovação estratégica para o setor portuário brasileiro, fortalecendo eficiência, resiliência e sustentabilidade. O avanço depende da ampliação das políticas de transformação digital, da interoperabilidade tecnológica e da consolidação de uma gestão orientada por dados.

Uma proposta de implantação de um sistema de Gêmeo Digital em um outro porto do Sudeste do Brasil pode seguir um processo progressivo e modular. Inicialmente, estabelece-se um núcleo de integração de dados conectando sensores IoT, AIS, sistemas de tráfego marítimo e dados ambientais locais. Em seguida, desenvolve-se a modelagem digital da infraestrutura e operação do porto, possibilitando simulações de atracação, fluxos logísticos e cenários de impacto climático.

Com a maturidade do sistema, o porto pode conectar-se de forma integrada a outros terminais brasileiros, criando uma rede interportos robusta e altamente colaborativa, baseada em padrões avançados de interoperabilidade, conforme amplamente recomendado pela literatura especializada. Essa integração permite promover uma gestão colaborativa e preventiva de riscos e viabiliza a otimização regional de rotas, fluxos logísticos e capacidades instaladas. A partir desse estágio, o modelo pode evoluir para um sistema verdadeiramente prescritivo, apoiado por IA distribuída e análises em tempo real, reduzindo custos operacionais, ampliando significativamente a segurança das operações e fortalecendo de maneira consistente a sustentabilidade marítima e portuária.

6 CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

A análise apresentada evidencia que a implantação de Gêmeos Digitais (DTs) no setor portuário brasileiro representa uma estratégia promissora para ampliar eficiência operacional, previsibilidade e sustentabilidade. O estudo demonstra, contudo, que a adoção dessa tecnologia ainda é incipiente, enfrentando barreiras estruturais e organizacionais, especialmente relacionadas à interoperabilidade entre sistemas, à padronização tecnológica e à qualificação dos recursos humanos. Os resultados indicam que a digitalização apoiada em DTs contribui para a redução de tempos operacionais, a antecipação de falhas e a otimização do uso de recursos energéticos e ambientais. A integração em

tempo real entre ativos físicos e modelos virtuais estabelece um novo paradigma de gestão orientada por dados, simulações e análises preditivas, fortalecendo a tomada de decisão estratégica em ambientes portuários complexos.

No âmbito institucional, destaca-se a necessidade de políticas públicas voltadas à transformação digital, bem como de marcos regulatórios que promovam a interoperabilidade e incentivem parcerias entre universidades, autoridades portuárias e o setor privado. A formação de um ecossistema colaborativo mostra-se essencial para o desenvolvimento de soluções alinhadas ao contexto brasileiro e às melhores práticas internacionais. Nesse sentido, os DTs configuram-se não apenas como um avanço tecnológico, mas como um vetor estratégico de modernização e competitividade, cuja efetividade depende da integração entre inovação, governança e sustentabilidade.

Quanto às perspectivas futuras, recomenda-se o avanço de pesquisas focadas na implementação prática e na avaliação quantitativa dos DTs em portos de diferentes perfis, regiões e escalas, explorando a integração entre simulação, Internet das Coisas (IoT) e Inteligência Artificial (IA). Sugere-se ainda o desenvolvimento de um modelo nacional de referência, com padronização de arquiteturas, protocolos e indicadores de desempenho, além da investigação de eixos como maturidade digital, interoperabilidade, modelos econômicos e validação de investimentos, conforme discutido por (Zheng et al., 2019), considerando as especificidades do contexto latino-americano.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em síntese, os Gêmeos Digitais (DTs) apresentam-se não apenas como uma inovação tecnológica emergente, mas como um instrumento estruturante para a competitividade e sustentabilidade do setor portuário brasileiro, cuja consolidação dependerá da articulação entre inovação tecnológica, governança de dados e políticas públicas orientadas à transformação digital.

Sob a perspectiva acadêmica, este trabalho contribui ao sistematizar o estado da arte e propor um framework analítico aplicável ao contexto nacional. Recomenda-se o aprofundamento de estudos voltados à mensuração de impactos operacionais e econômicos, à análise comparativa entre terminais e à validação de modelos de implantação em larga escala.

Do ponto de vista estratégico, os resultados sugerem que a implementação progressiva e modular dos DTs pode contribuir para reduzir riscos de investimento, ampliar a eficiência energética e fortalecer

práticas alinhadas às agendas ESG, além de promover maior integração entre portos e cadeias logísticas globais. A evolução para arquiteturas interoperáveis e redes interportuárias orientadas por dados representa um caminho promissor para a modernização do sistema portuário brasileiro.

A adoção dessa tecnologia no Brasil ainda se encontra em estágio inicial, sobretudo em função de desafios estruturais relacionados à interoperabilidade entre sistemas, à heterogeneidade de dados, à maturidade digital das organizações e à qualificação técnica das equipes envolvidas. Nesse sentido, evidencia-se que o avanço dos DTs no contexto nacional dependerá não apenas do desenvolvimento tecnológico, mas também da consolidação de um ecossistema institucional colaborativo que integre universidades, operadores portuários, autoridades públicas e fornecedores de tecnologia.

A presente investigação permitiu consolidar evidências de que os DTs se configuram como uma das principais tecnologias habilitadoras da transformação digital no setor portuário brasileiro, apresentando potencial significativo para elevar os níveis de eficiência operacional, previsibilidade, resiliência e sustentabilidade ambiental. Ao integrar modelos virtuais dinâmicos, dados em tempo real e ferramentas analíticas avançadas, os DTs ampliam a capacidade de planejamento e controle das operações portuárias, oferecendo suporte robusto à tomada de decisão em ambientes caracterizados por elevada complexidade sistêmica e variabilidade operacional.

REFERÊNCIAS

ANWAR, Mahwish; HENESEY, Lawrence; CASALICCHIO, Emiliano. Digitalization in Container Terminal Logistics: A Literature Review. In: IAME 2019 CONFERENCE, 2019, Athens. Anais [...]. Athens: IAME, 2019.

BARI, D.; DINI, N.; NARDINI, A.; PAPUCCI, M.; PAROLI, G.; SCARSI, M. et al. An Innovative Approach to Port Monitoring: Digital Twin, Strategic Decision Systems and Port Governance. In: THE INTERNATIONAL MARITIME AND LOGISTICS CONFERENCE (MARLOG 13), 13., 2024, Alexandria. Anais [...]. Alexandria: Arab Academy for Science, Technology and Maritime Transport, 2024. DOI: https://doi.org/10.21622/MARLOG.2024.13.1.117.

DU, Yanan; LIANG, Xianfeng; ZHAO, Yufei; XUAN, Yuxin. Digital Twin Container Terminal Yard System Construction. Processes, v. 11, n. 7, art. 2223, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/pr11072223.

GALKIN, A.; SAMCHUK, G.; KOPYTKOV, D. et al. Digital twins in logistics: a comprehensive bibliometric analysis for advancing smart cities and sustainable development. Discover Sustainability, v. 6, art. 853, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s43621-025-01754-0.

GAZZANEO, Lucia; LONGO, Francesco; MIRABELLI, Giovanni; PELLEGRINO, Melania; SOLINA, Vittorio. Towards Green and Smart Ports: A Review of Digital Twin and Hydrogen Applications in Maritime Management. Applied System Innovation, v. 8, n. 6, art. 165, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/asi8060165.

GONZÁLEZ-CANCELAS, Nicoletta; MARTÍNEZ MARTÍNEZ, Pedro; VACA-CABRERO, Javier; CAMARERO-ORIVE, Alberto. Optimization of Port Asset Management Using Digital Twin and BIM/GIS in the Context of Industry 4.0: A Case Study of Spanish Ports. Processes, v. 13, n. 3, art. 705, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/pr13030705.

GRIEVES, Michael W. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication [Relatório técnico (White Paper)]. [S. l.]: Michael W. Grieves, LLC, 2014. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.1493930.

HAAG, Sebastian; ANDERL, Reiner. Digital twin – Proof of concept. Manufacturing Letters, v. 15, pt. B, p. 64–66, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.02.006.

HAAR, Jaap O.; RODRIGUEZ, Francisco. Digital Twin-Based Simulation for Predictive Decision-Making in Waterway Logistics. arXiv, 2026. Disponível em: https://arxiv.org/.

HAKIMI, Yassine; KHALED, Mohamed; AL-KHARAZA, Ahmad; FOAHOM, Brice; AMZIL, Hamid. Towards a Digital Twin Modeling Method for Container Terminal Port. Procedia Computer Science, v. 246, p. 3575–3584, 2024. DOI: 10.1016/j.procs.2024.09.361.

HOMAYOUNI, Amir; SOUSA, Paulo de; MARQUES, Mário. Unlocking the Potential of Digital Twins to Achieve Sustainability in Seaports: The State of Practice and Future Outlook. WMU Journal of Maritime Affairs, v.24, p. 59-98, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s13437-024-00349-2.

JONES, David; SNIDER, Chris; NASSEHI, Aydin; YON, Jason; HICKS, Ben. Characterising the Digital Twin: A Systematic Literature Review. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 29, p. 36–52, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002.

KLAR, Robin; FREDRIKSSON, Anders; ANGELAKIS, Vangelis. Digital Twins for Ports: Derived From Smart City and Supply Chain Twinning Experience. IEEE Access, v. 11, p. 71777–71799, 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3295495.

KRITZINGER, Werner; KARNER, Matthias; TRAAR, Georg; HENJES, Jan; SIHN, Wilfried. Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification. IFAC-PapersOnLine, v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

LE, Thi Hong; FAN, Yijie. Digital Twins for Logistics and Supply Chain Systems: Literature Review, Conceptual Framework, Research Potential, and Practical Challenges. Computers & Industrial Engineering, v. 184, art. 109768, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109768.

MADUSANKA, Nuwan Sri; FAN, Yijie; YANG, Shaolong; XIANG, Xianbo. Digital Twin in the Maritime Domain: A Review and Emerging Trends. Journal of Marine Science and Engineering, v. 11, n. 5, art. 1021, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/jmse11051021.

NEUGEBAUER, J.; HEILIG, Lars; VOß, Stefan. Digital Twins in the Context of Seaports and Terminal Facilities. Flexible Services and Manufacturing Journal, v. 36, p. 821–917, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10696-023-09515-9.

RAZMJOOEI, D.; ALIMOHAMMADLOU, M.; RANAEI KORDSHOULI, H. A.; Kazem Askarifar, K. Industry 4.0 research in the maritime industry: a bibliometric analysis. WMU Journal of Maritime Affairs, v. 22, p. 385–416, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s13437-022-00298-8.

RUDSKOY Andrey; ILIN, Igor; PROKHOROV, Andrey. Digital Twins in the Intelligent Transport Systems. Transportation Research Procedia, v. 54, p. 927–935, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.152.

SEMERARO Concetta; LEZOCHE, Mario; PANETTO, Hervé; DASSISTI, Michele. Digital twin paradigm: A systematic literature review. Computers in Industry, v. 130, art. 103469, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469.

THELEN, Alexander; ZHANG, Y.; FINK, O. et al. A Comprehensive Review of Digital Twin – Part 1: Modeling and Twinning Enabling Technologies. Structural and Multidisciplinary Optimization, v. 65, art. 354, 2022. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.14197.

TOOMEOJA, Kätlin; GÜLMEZ, Burcu; TAPANINEN, Ulla. Systematic Review of Smart Ports: Trends and Future Research Directions. TransNav, v. 19, n. 3, p. 637–646, 2025. DOI: https://doi.org/10.12716/1001.19.03.24.

TZACHOR, Asaf; SABRI, Saeed; RICHARDS, Claire E.; RAJABIFARD, Abbas; ACUTO, Michele. Potential and Limitations of Digital Twins to Achieve the Sustainable Development Goals. Nature Sustainability, v. 5, p. 822–830, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41893-022-00923-7.

UHLEMANN, Thomas H.-J.; SCHOCK, Christoph; LEHMANN, Christian; FREIBERGER, Stefan; STEINHILPER, Rolf. The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems. Procedia Manufacturing, v. 9, p. 113–120, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.043.

WRIGHT, Louise; DAVIDSON, Stuart. How to tell the difference between a model and a digital twin. Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, v. 7, art. 13, 2020. DOI: https://doi.org/10.1186/s40323-020-00147-4.

YAO, Y.; WANG, J.; SU, Y.; QI, L. Application of Digital Twins in Port System. Journal of Physics: Conference Series, v. 1846, n. 1, art. 012008, 2021. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1846/1/012008.

ZHENG, Yue; YANG, Shuang; CHENG, Hui. An application framework of digital twin and its case study. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, v. 10, p. 1141–1153, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s12652-018-0911-3.

ZOCCO, Andrea; WANG, Cheng; VAN, Toai. Digital Twins for Marine Operations: A Brief Review on Their Implementation. arXiv, 2023. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.09574.

Capítulo 18

10.37423/260911414

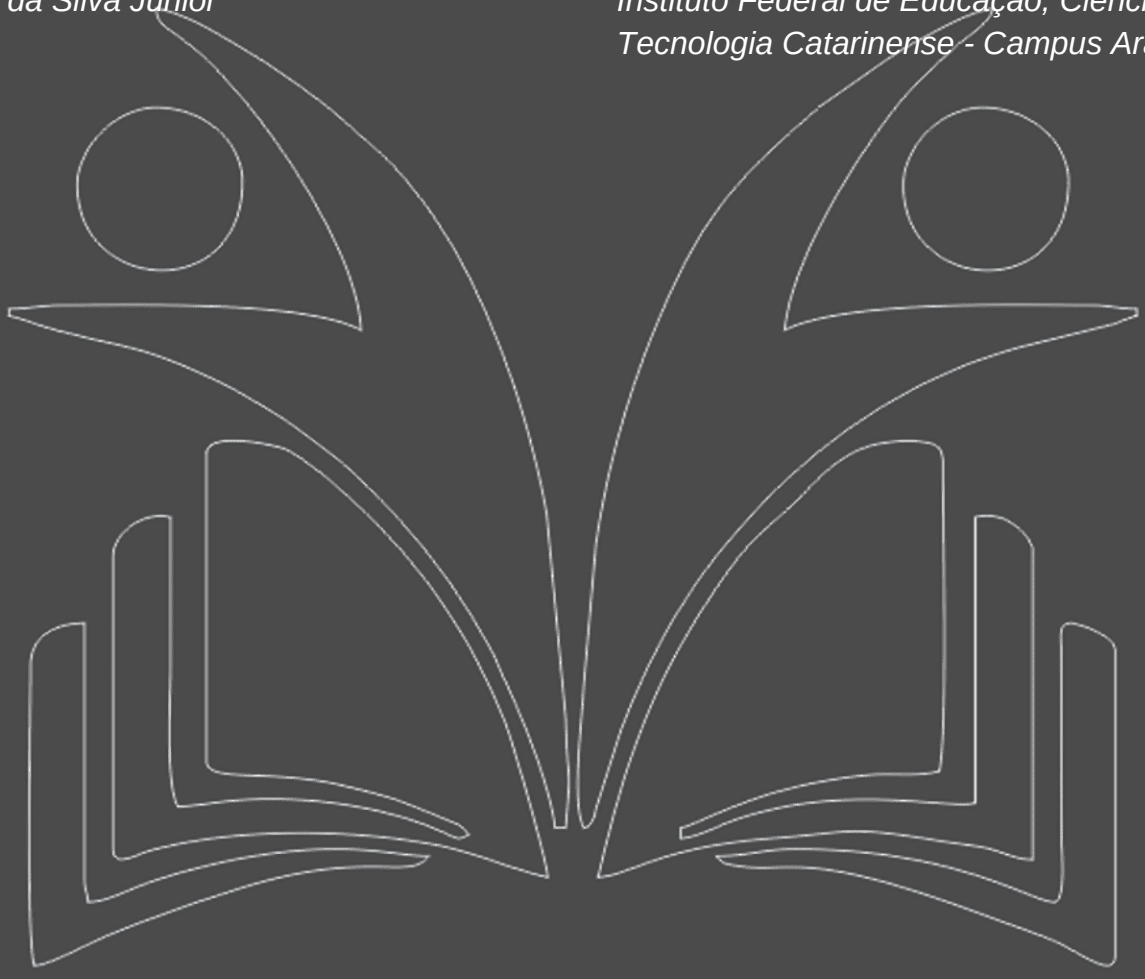
UMA ABORDAGEM BASEADA EM MODELOS DO TIPO COSMO PARA PREDIÇÃO DA VISCOSIDADE CINEMÁTICA EM SISTEMAS MULTICOMPONENTES: APLICAÇÃO AO BIODIESEL

Gabriel Oliveira da Silva

Universidade Federal de Santa Catarina

Julio Lopes da Silva Junior

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Catarinense - Campus Araquari



RESUMO

A viscosidade cinemática dos biodieseis é uma propriedade importante para o projeto e a operação de processos, mas, em função do número de ésteres graxos que compõem a mistura, sua predição pode se tornar complexa. Modelos empíricos de viscosidade podem exigir parâmetros de interação específicos, enquanto abordagens baseadas na estrutura molecular oferecem a possibilidade de reduzir essa dependência de dados experimentais. Neste trabalho é proposta uma abordagem denominada Eyring-CS25, que combina a teoria da taxa absoluta de Eyring com coeficientes de atividades calculados pelo modelo CS25, uma variante do modelo COSMO-SAC. Assume-se que a contribuição da não idealidade da mistura para a energia de Gibbs de ativação do fluxo viscoso pode ser aproximada como proporcional à energia de Gibbs em excesso da mistura por meio da utilização de um parâmetro linear de ajuste de escala. O modelo foi aplicado a biodieseis provenientes de seis matérias-primas diferentes, na faixa de temperaturas entre 313,15 K e 353,15 K, utilizando composições e propriedades experimentais para os ésteres puros disponíveis na literatura. O ajuste global do modelo apresentou um desvio relativo médio absoluto de 3,59 % e R2 = 0,9803 para o banco de dados avaliado. Os resultados mostram boa concordância entre os valores calculados e experimentais para os sistemas investigados, embora os padrões de resíduos sugiram possível dependência do parâmetro de ajuste de escala com a composição molecular. A abordagem fornece, assim, uma estrutura baseada em informações moleculares para a estimativa da viscosidade de misturas de ésteres graxos.

Palavras-chave: Viscosidade Cinemática; COSMO-SAC; Biodiesel; Equação de Eyring; Energia de Gibbs em excesso.

1 INTRODUÇÃO

As preocupações políticas e socioambientais e os riscos de escassez energética, têm impulsionado uma transição energética para fontes renováveis e limpas. Sob este viés há o "Compromisso pela qualidade do ar e saúde ambiental" (BRASIL, 2009) que incentiva o uso de combustíveis mais limpos, dentre eles o biodiesel; unido ao anseio de melhorar os processos industriais.

Esta fonte de energia é dada por uma mistura de ésteres graxos, normalmente obtidos pela reação de transesterificação de óleos e graxas com um álcool de cadeia curta, na presença de um catalisador, resultando em uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos a depender do álcool, neste caso metanol ou etanol, respectivamente. Portanto, o biocombustível obtido nestas condições possui propriedades semelhantes ao petrodiesel, permitindo a mistura de ambos (Fontoura et al., 2023), de tal modo que esta prática está prevista na legislação brasileira como obrigatória desde 2008 e há vistas de aumentos progressivos da quantidade de biodiesel no diesel nos próximos anos (BRASIL, 2020).

O incentivo ao uso do biodiesel está intrinsecamente alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU). A transição para esse biocombustível contribui diretamente para a expansão da energia limpa e acessível (ODS 7), promove padrões de produção e consumo responsáveis na cadeia energética (ODS 12) e atua como ferramenta de mitigação frente às mudanças globais do clima através da redução da pegada de carbono (ODS 13).

Para o projeto, controle e otimização dos processos industriais, bem como para avaliação da qualidade dos produtos, o conhecimento sobre as propriedades das substâncias envolvidas é necessário. No caso do biodiesel, bem como de outros produtos industriais, a viscosidade é uma das principais propriedades, pois é essencial para cálculos de transporte de fluidos e de transferência de energia (Haj-Kacem et al., 2016). Além disto, a viscosidade do biodiesel e de seus componentes também é necessária para o monitoramento da qualidade do próprio combustível e da eficiência de uma mistura (Cantiani et al., 2018), além de ser um dos parâmetros de especificação comercial dos combustíveis. Assim, é fundamental compreender o comportamento desta propriedade e, como é infactível determiná-la experimentalmente para todas as temperaturas, pressões e composições imagináveis, é altamente desejável ter modelos matemáticos capazes de predizer seu comportamento. Além disso, o desenvolvimento de correlações preditivas precisas com base na composição de ésteres graxos possui aplicação direta no gerenciamento técnico e econômico de misturas de matérias-primas industriais (Ferreira et al., 2021).

Muitos modelos de viscosidade já foram publicados na literatura, sendo a maioria deles baseados no princípio dos estados correspondentes ou na teoria da taxa absoluta de reação de Eyring (Bosse e Bart, 2005). Entretanto, para misturas, o cálculo da viscosidade é um problema complexo pois a viscosidade não segue regras de aditividade linear. Existem correlações empíricas clássicas para corrigir isso, como a de Grunberg-Nissan (Grunberg e Nissan, 1949), mas elas exigem, geralmente, parâmetros de interação binária que são obtidos a partir de correlação de dados experimentais. Para uma mistura múltipla como o biodiesel, o número de parâmetros de interação binária exigido seria muito grande, tornando o método inviável na prática. Nesse contexto, como apontam Ferreira et al. (2021) em ampla revisão da literatura, a maior parte dos modelos propostos para predição da viscosidade do biodiesel foca em correlações puramente empíricas e restritas a conjuntos limitados de biomassa, gerando desvios consideráveis.

Contudo, uma abordagem interessante para este caso é a utilização de modelos preditivos de energia de Gibbs de excesso para a redução da necessidade de dados experimentais exaustivos, uma vez que qualquer modelo de energia de Gibbs em excesso pode ser acoplado à teoria de Eyring para representar as não-idealidades de uma mistura, como detalharemos na Seção 2.1. Os trabalhos de Bosse e Bart (2005) e Matsuda et al. (2019) apresentam desenvolvimentos de modelos de viscosidade nesta perspectiva. Dentre os modelos de energia de Gibbs em excesso disponíveis, têm se destacado, atualmente, aqueles baseados na metodologia COSMO, como o COSMO-SAC e suas variantes, dentre as quais se encontra o modelo CS25, proposto por Soares et al. (2025), que aprimora a descrição de interações moleculares complexas em relação ao modelo COSMO-SAC original desenvolvido por Lin e Sandler (2002).

No modelo COSMO-SAC, bem como suas extensões posteriores, cada molécula é descrita por uma distribuição de densidade de carga superficial aparente a partir da energia livre de solvatação das moléculas em solução determinada pelo método COSMO (Klamt e Schüürmann, 1993). Essas densidades de carga são usualmente representadas por uma função de variável única denominada perfil sigma (ou simplesmente perfil-σ). O perfil sigma de uma molécula estabelece uma relação entre a fração da superfície molecular e a densidade de carga correspondente e é obtido a partir de sua estrutura eletrônica, computada por métodos de química quântica. Assim, o cálculo da energia de Gibbs em excesso (ou do coeficiente de atividade, como mostrado na equação (13) da seção a seguir) de acordo com o COSMO-SAC requer, portanto, o perfil sigma, a área superficial de van der Waals, o volume de cada molécula presente na mistura e um pequeno conjunto de parâmetros universais, o

que torna o modelo genuinamente preditivo (Bouillot et al., 2013). Essa base conceitual torna a abordagem amplamente aplicável para predizer tanto o equilíbrio de fases quanto reações químicas, além de ser particularmente vantajosa, pois depende praticamente apenas da estrutura química das substâncias.

Diante desse cenário, este trabalho propõe e avalia uma abordagem para a predição da viscosidade cinemática de misturas de ésteres graxos baseada no acoplamento da teoria de Eyring a coeficientes de atividade calculados pelo modelo CS25. A hipótese central é que a contribuição de não idealidade da mistura para a energia de Gibbs de ativação do fluxo viscoso pode ser aproximada por uma proporcionalidade com a energia de Gibbs em excesso da mistura. A abordagem é avaliada para biodieseis de diferentes composições e em diferentes temperaturas, buscando verificar sua capacidade de representar a viscosidade sem a necessidade de parâmetros binários específicos para cada par de componentes a fim de estabelecer uma alternativa confiável para a estimativa de propriedades de transporte em engenharia de processos.

2 METODOLOGIA

2.1 Derivação do Modelo Eyring-CS25

A viscosidade de um líquido está associada à resistência ao movimento relativo de suas moléculas e, do ponto de vista da teoria da taxa absoluta de Eyring, pode ser interpretada como uma propriedade relacionada à energia necessária para que ocorram os rearranjos moleculares envolvidos no processo de escoamento (Glasstone, Laidler e Eyring, 1964 apud Matsuda et al., 2019; Kincaid, Eyring e Stearn, 1941). A teoria de Eyring fornece, nesse contexto, uma descrição da viscosidade baseada em um processo de ativação, permitindo relacionar a propriedade de transporte à energia de Gibbs de ativação do fluxo viscoso. Para uma mistura líquida, essa relação pode ser escrita como

$$\eta = \frac{h\,N_A}{V_m} exp\left(\frac{\Delta g^{\ddagger}}{RT}\right) \qquad \text{(Eq. 1)}$$

em que η é a viscosidade dinâmica da mistura, h é a constante de Planck (6,62607015x10-34 J s), NA é a constante de Avogadro (6,02214076x1023 mol-1), Vm é o volume molar da mistura, Δg‡ é a energia

de Gibbs molar de ativação associada ao escoamento, R é a constante universal dos gases (8,314462618 J mol-1 K-1) e T é a temperatura absoluta.

Como o volume molar da mistura pode ser relacionado à sua massa molar (M) e à sua densidade (ρ) por

$$V_m = \frac{M}{\rho} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

e sendo esta última de mais fácil obtenção experimental e mais frequentemente encontrada na literatura do que o próprio volume molar, a Equação (1) pode ser reescrita como

$$\eta = \frac{h\,N_A\,\rho}{M} exp\left(\frac{\Delta g^{\ddagger}}{RT}\right) \qquad \text{(Eq. 3)}$$

A viscosidade cinemática (ν) é definida pela razão entre a viscosidade dinâmica e a densidade,

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Combinando as equações (3) e (4), obtém-se

$$\nu = \frac{h\,N_A}{M} exp\left(\frac{\Delta g^{\ddagger}}{RT}\right) \qquad \text{(Eq. 5)}$$

ou, equivalentemente,

$$ln\,(\nu M) = ln\,(h\,N_A) + \frac{\Delta g^{\ddagger}}{RT} \qquad \text{(Eq. 6)}$$

Em princípio, a Equação 6 pode ser utilizada para descrever tanto a viscosidade de misturas ideais quanto a de sistemas não ideais. Assim, para uma mistura líquida ideal no que diz respeito à viscosidade, a Equação 6 pode ser escrita como:

$$ln\,(\nu M)^{id} = ln\,(h\,N_A) + \frac{\Delta g^{\ddagger,id}}{RT} \qquad \text{(Eq. 7)}$$

onde o sobrescrito id se refere à respectiva propriedade em uma mistura líquida ideal.

A energia de Gibbs de ativação molar para o escoamento pode ser considerada como a soma de uma contribuição ideal e de um termo de correção, ou de excesso (Δg‡,E). Ou seja,

$$\Delta g^{\ddagger} = \Delta g^{\ddagger,id} + \Delta g^{\ddagger,E} \qquad \text{(Eq. 8)}$$

A combinação das Equações (6), resolvida para Δg‡, e (7), resolvida para Δg‡,id, com a Equação (8) conduz à seguinte expressão:

$$ln\,(\nu M) = ln\,(\nu M)^{id} + \frac{\Delta g^{\ddagger,E}}{RT} \qquad \text{(Eq. 9)}$$

Esta forma da equação de Eyring é particularmente conveniente para o desenvolvimento de um modelo de viscosidade de misturas, pois permite separar a contribuição associada ao comportamento ideal da solução daquela decorrente das interações entre diferentes espécies químicas.

Uma escolha criteriosa da expressão do termo ideal e do termo em excesso é de importância fundamental para que o modelo consiga correlacionar e prever as viscosidades de sistemas multicomponentes. A termodinâmica clássica fornece uma descrição matemática inequívoca das propriedades de soluções ideais. No entanto, infelizmente, o mesmo não ocorre para a viscosidade de soluções. Não existe uma equação única para a contribuição ideal da viscosidade. Assim, neste desenvolvimento, adotar-se-á, para a contribuição ideal, a relação proposta por Glasstone, Laidler e Eyring (1964 apud Matsuda et al., 2019) empregada na modelagem de misturas dada por:

$$ln\,(\nu M)^{id} = \sum_{i=1}^{NC} x_i\, ln\,(\nu_i M_i) \qquad \text{(Eq. 10)}$$

em que NC é o número de componentes da mistura e xi, vi e Mi são, respectivamente, a fração molar, a viscosidade cinemática e a massa molar do cada componente i da mistura.

A Eq. 10 representa a contribuição ideal da mistura em termos das propriedades dos componentes puros. Entretanto, ela não contempla os efeitos decorrentes das não-idealidades. Esses efeitos estão reunidos no termo da energia de Gibbs de ativação em excesso para o fluxo viscoso, Δg‡,E, que constitui, portanto, a conexão entre a descrição de Eyring e um modelo termodinâmico capaz de representar as interações intermoleculares na fase líquida.

É importante destacar que, diferentemente da energia de Gibbs em excesso de uma solução em equilíbrio, não existe uma relação termodinâmica geral que determine de forma única a energia de Gibbs de ativação em excesso associada ao transporte viscoso. Assim, é necessário introduzir uma hipótese adicional para relacionar essa propriedade de transporte a uma propriedade termodinâmica de equilíbrio. Uma alternativa consiste em assumir que os desvios da viscosidade em relação ao comportamento ideal podem ser relacionados à energia de Gibbs (ΔgE) de excesso da mistura com a inclusão de um parâmetro de ajuste de escala k entre os termos $\frac{\Delta g^{\ddagger,E}}{RT}$ e $\frac{\Delta g^{E}}{RT}$:

$$\frac{\Delta g^{\ddagger,E}}{RT} = k\frac{\Delta g^{E}}{RT} \qquad \text{(Eq. 11)}$$

A Equação (11) constitui uma hipótese e sua adoção pressupõe que, dentro do domínio de aplicação considerado, a informação sobre as interações intermoleculares contida em ΔgE seja suficiente para representar, mediante o fator de escala k, a contribuição dessas interações para a barreira energética associada ao escoamento. Relações desse tipo já foram empregadas anteriormente no desenvolvimento da teoria de Eyring (Kincaid, Eyring e Stearn, 1941) e, mais recentemente, em abordagens que combinam a teoria de Eyring com modelos termodinâmicos de não idealidade (Onodera et al., 2021; Matsuda et al., 2019; Novak, 2006; Bosse e Bart, 2005).

Neste trabalho, assume-se, como primeira aproximação, que k possa ser tratado como independente da temperatura e da composição no domínio experimental investigado. Essa hipótese é particularmente relevante para a proposta do modelo, pois permite representar diferentes misturas por um mesmo parâmetro, enquanto as diferenças de composição e temperatura são introduzidas por meio das propriedades dos componentes puros e dos coeficientes de atividade, sobre os quais trataremos em breve.

Substituindo a Equação (11) na Equação (9), e utilizando a relação para a contribuição ideal dada pela Equação (10), resulta:

$$ln\,(\nu M) = \sum_{i=1}^{NC} x_i\, ln\,(\nu_i M_i) + k\frac{\Delta g^{E}}{RT} \qquad \text{(Eq. 12)}$$

Sabe-se da termodinâmica de soluções que a energia de Gibbs em excesso pode ser obtida diretamente a partir dos coeficientes de atividade das espécies presentes na mistura:

$$\frac{\Delta g^E}{RT} = \sum_i^{NC} x_i \ln \gamma_i \qquad \text{(Eq. 13)}$$

em que γi é o coeficiente de atividade do componente i.

Logo, a combinação das Equações (12) e (13) resulta em:

$$\ln (\nu M) = \sum_{i=1}^{NC} x_i \ln (\nu_i M_i) + k\left(\sum_i^{NC} x_i \ln \gamma_i\right) \qquad \text{(Eq. 14)}$$

Finalmente, aplicando propriedades de logaritmos, organizando a Equação (14) para isolar o termo da viscosidade cinemática (v) e considerando que a massa molar da mistura é dada por

$$M = \sum_i^{NC} x_i M_i \qquad \text{(Eq. 15)}$$

obtém-se a expressão final do modelo, uma equação analítica para o cálculo da viscosidade cinemática para uma mistura multicomponente em uma determinada temperatura T:

$$\nu = \left(\frac{1}{M}\right) exp\left[\sum_i^{NC} x_i ln\left(\nu_i M_i \gamma_i^k\right)\right] \qquad \text{(Eq. 16)}$$

A Equação (16) evidencia uma estrutura física para a o cálculo da viscosidade cinemática a partir de modelos de coeficiente de atividade para representar o efeito da não idealidade em uma mistura, a partir da hipótese da introdução de um parâmetro de ajuste de escala k independente da composição e da temperatura. Essa estrutura também permite separar claramente as funções desempenhadas pelas duas partes da abordagem. As propriedades dos componentes puros fornecem a referência para o comportamento viscoso individual das espécies, enquanto os coeficientes de atividade introduzem a influência das interações intermoleculares decorrentes da composição da mistura. Assim, a contribuição da não idealidade não precisa ser representada diretamente por parâmetros de interação

específicos para cada par de componentes na equação de viscosidade; ela é obtida a partir de um modelo termodinâmico de coeficiente de atividade.

Por fim, ressalta-se que o parâmetro k não deve ser interpretado, à priori, como uma constante universal ou como relação termodinâmica fundamental entre ΔgE e Δg‡,E. Seu significado, nesta formulação, é o de um parâmetro efetivo de acoplamento entre propriedades de equilíbrio e de transporte, cuja constância deve ser avaliada empiricamente dentro do domínio de composição e temperatura considerado. A determinação de um único valor de k para diferentes biodieseis constitui, portanto, uma hipótese a ser testada na etapa de ajuste e validação do modelo.

No presente estudo, os coeficientes de atividade são calculados pelo modelo CS25. Dessa forma, a Equação (16) estabelece o acoplamento entre a teoria de Eyring, utilizada para descrever o processo de escoamento, e o modelo CS25, utilizado para representar termodinamicamente a não idealidade da fase líquida. Por isso, nos referiremos a esta abordagem como modelo Eyring-CS25. Da mesma forma, como o fator do ajuste de escala representará a proporcionalidade entre a energia de Gibbs de ativação viscosa do sistema e a energia de Gibbs da mistura calculada pelo modelo CS25, representaremos o parâmetro obtido neste trabalho por kCS25.

2.1.1 Cálculo das propriedades dos componentes puros

A aplicação da Equação (16) requer, além dos valores de xi e γi, os valores de vi e Mi para cada componente i da mistura na temperatura considerada. A massa molar Mi é uma propriedade conhecida do componente. A viscosidade cinemática vi dos componentes puros, por sua vez, pode ser obtida a partir da relação

$$\nu_i = \frac{\eta_i}{\rho_i} \qquad \text{(Eq. 17)}$$

em que ηi e ρi são, respectivamente, a viscosidade dinâmica e densidade do componente i puro. No presente trabalho, a densidade é calculada pela equação de Rackett modificada (Ihmels e Gmehling, 2001) – Equação (18) -, enquanto a viscosidade dinâmica é representada pela correlação de Ghatee et al. (2010) – Equação (19).

$$\rho = \left(\frac{A_R}{B_R^{[1+(1-(T/C_R))^{D_R}]}} \right) \quad \text{(Eq. 18)}$$

$$\left(\frac{1}{\eta}\right)^{\varphi} = aT + b \quad \text{(Eq. 19)}$$

Nas Equações (18) e (19), AR, BR, CR, DR, a, b e ϕ são parâmetros ajustáveis e T é a temperatura absoluta. Estes parâmetros foram determinados a partir da correlação de dados experimentais disponíveis na literatura na faixa de temperatura correspondente aos dados considerados, conforme reportado em trabalho anterior (Silva e Silva Jr., 2025), no qual os autores verificaram que estes modelos conseguem representar satisfatoriamente as referidas propriedades dos ésteres metílicos.

Os parâmetros ajustados para as Equações (18) e (19), correspondentes a cada um dos ésteres graxos puros que constituem os biodieseis avaliados neste trabalho, estão apresentados nas Tabelas 1 e 2 a seguir.

Tabela 1. Parâmetros do modelo Rackett-modificado.

Éster[a]	AR (kg m^{-3})	BR	CR (K)	DR	Faixa de Temperatura	AARD (%)
C8:0	297,7378	0,5137	558,9693	0,6386	283,15 – 453,15	0,07
C10:0	243,2360	0,4685	627,7264	0,6022	278,15 – 453,15	0,04
C12:0	383,2664	0,5773	604,5591	1,0714	283,15 – 360,05	0,06
C14:0	213,9252	0,4412	748,0742	0,6874	293,15 – 353,15	0,01
C16:0	575,7224	0,7202	381,8921	0,9701	308,15 – 373,15	0,01
C18:0	579,2488	0,7171	372,0500	1,0158	310,95 – 372,05	0,02
C18:1	595,0850	0,7345	380,2138	0,9527	283,15 – 373,15	0,01
C18:2	359,5005	0,5729	584,4380	0,6886	278,15 – 373,15	0,04
C18:3	595,8330	0,7217	396,4187	0,9696	278,15 – 363,15	0,00
C20:0	244,8687	0,4598	1.238,9329	1,7460	323,15 – 373,15	0,00

[a]C8 :0: octanoato de metila; C10:0: decanoato de metila; C12:0: dodecanoato de metila; C14:0: tetradecanoato de metila; C16:0: hexadecanoato de metila; C18:0: octadecanoato de metila; C18:1: oleato de metila; C18:2: linoleato de metila; C18:3: linolenato de metila; C20:0: eicosanoato de metila

Tabela 2. Parâmetros do modelo de Ghatee

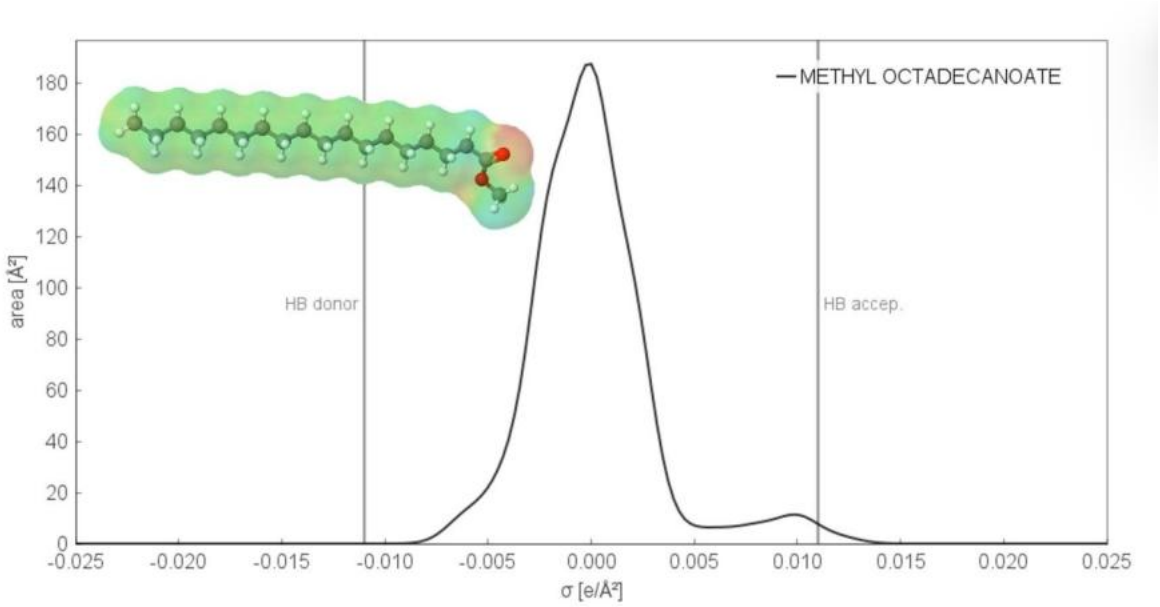
Éster	φ	a ($mPa^{-\varphi}\ s^{-\varphi}\ K^{-1}$)	b ($mPa^{-\varphi}\ s^{-\varphi}$)	Faixa de Temperatura	AARD (%)
C8:0	0,63450	0,00920	-1,90880	283,15 – 372,05	1,68
C10:0	0,58025	0,00782	-1,64703	278,15 – 363,15	0,68
C12:0	0,56146	0,00712	-1,56086	283,15 – 373,15	0,61
C14:0	0,60884	0,00674	-1,57738	293,15 – 353,15	0,54
C16:0	0,48798	0,00566	-1,23948	303,15 – 363,15	2,91
C18:0	0,49483	0,00545	-1,25369	313,00 – 363,15	0,17
C18:1	0,47631	0,00548	-1,19415	273,15 – 453,15	1,31
C18:2	0,51983	0,00562	-1,21085	278,15 – 353,15	2,14
C18:3	0,56319	0,00573	-1,24199	278,15 – 373,15	3,86
C20:0	0,51649	0,00528	-1,26185	323,15 – 373,15	0,04

2.1.2 Cálculo dos coeficientes de atividade das espécies na mistura

Os coeficientes de atividade das espécies na mistura foram calculados utilizando o modelo CS25, implementado no pacote computacional open-source JCOSMO, versão 3.0.0, desenvolvido pela equipe do Laboratório Virtual de Predição de Propriedades da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (https://www.ufrgs.br/lvpp/) (Soares, [s.d.]; Ferrarini et al., 2018; Soares et al., 2017; Gerber e Soares, 2010). O cálculo dos coeficientes de atividade requer os perfis de densidade de carga superficial (perfis-σ) das moléculas, obtidos a partir de cálculos de estrutura eletrônica realizados previamente. Os procedimentos computacionais empregados para a geração desses perfis são descritos em detalhe por Soares et al. (2025).

A relação entre a representação molecular utilizada nos cálculos COSMO e o perfil de densidade de carga superficial é ilustrada na Figura 1, a título de exemplo, para um dos ésteres metílicos considerados neste trabalho (octadecanoato de metila). A superfície COSMO representa a distribuição de carga na superfície molecular, enquanto o perfil-sigma fornece a distribuição da área superficial da densidade de carga, constituindo a informação molecular utilizada pelo modelo CS25 nos cálculos dos coeficientes de atividade.

Figura 1. Superfície tridimensional de densidade de carga aparente do COSMO e perfil-σ do octadecanoato de metila utilizado nos cálculos de coeficientes de atividade pelo modelo CS25.



Fonte: Elaborada pelos autores com base nos arquivos COSMO utilizados neste trabalho.

Para os ésteres metílicos que compõem os biodieseis estudados neste trabalho, os respectivos arquivos COSMO, necessários para o cálculo dos coeficientes de atividade no JCOSMO, já estavam disponíveis no banco de dados fornecido pelo grupo do LVPP/UFRGS juntamente com a distribuição do pacote computacional.

2.2 Seleção dos dados experimentais e ajuste do modelo

Para ajuste do modelo desenvolvido, foram coletados valores de viscosidade cinemática em diferentes temperaturas (313,15 K a 353,15 K) disponíveis na literatura para biodieseis provenientes de óleos de seis matérias-primas diferentes: babaçu e semente de algodão (Nogueira Jr. et al., 2010), coco, soja e colza (Feitosa et al., 2010) e Macaúba (Sousa, 2023). Para a seleção dos dados a serem utilizados neste trabalho, foram adotados dois critérios principais: 1) que os dados das propriedades (viscosidade cinemática ou viscosidade dinâmica e densidade) e o perfil de ésteres graxos correspondessem exatamente à mesma amostra e 2) a disponibilidade de dados das propriedades (viscosidade cinemática ou viscosidade dinâmica e densidade) para os ésteres graxos puros na fase líquida na mesma temperatura do biodiesel que compõem. Após a aplicação dos critérios de seleção, o banco de dados final compreendeu n = 15 pontos experimentais. Na Tabela 3, são apresentados os perfis de ésteres metílicos de ácidos graxos, em termos de fração molar, para os biodieseis selecionados neste

estudo. Destacamos aqui que, usualmente, os perfis dos biodieseis são publicados na literatura como porcentagem em massa dos ésteres que os compõe (wi); entretanto, como as frações molares dos componentes são necessárias para a aplicação da Equação (16), a conversão entre as diferentes formas de expressar a composição de um componente i da mistura foi realizada a partir da Equação (20):

$$x_i = \frac{\frac{w_i}{M_i}}{\sum_{j=1}^{NC} \frac{w_j}{M_j}} \qquad \text{(Eq. 20)}$$

Tabela 3. Perfil de ésteres metílicos dos biodieseis estudados neste trabalho, em fração molar (xi)

Biodiesel	**Ésteres Metílicos de Ácidos Graxos (100 x_i)**									
	C8:0	**C10:0**	**C12:0**	**C14:0**	**C16:0**	**C18:0**	**C18:1**	**C18:2**	**C18:3**	**C20:0**
Babaçu[a]	-	6,71	32,15	25,85	13,97	4,14	17,19	-	-	-
Semente de algodão[a]	-	-	-	0,74	25,68	2,47	15,31	55,80	-	-
Soja[b]	-	-	-	-	12,22	-	25,28	54,45	8,05	-
Biodiesel	**Ésteres Metílicos de Ácidos Graxos (100 x_i)**									
	C8:0	**C10:0**	**C12:0**	**C14:0**	**C16:0**	**C18:0**	**C18:1**	**C18:2**	**C18:3**	**C20:0**
Coco[b]	6,13	4,66	39,19	19,45	12,15	3,14	11,46	3,82	-	-
Colza[b]	-	-	-	-	4,35	3,87	56,40	23,66	9,97	1,75
Macaúba c	8,16	5,42	48,06	11,35	7,13	2,24	15,51	2,13	-	-

[a]Nogueira Jr. et al. (2010); [b]Feitosa et al. (2010); [c]Sousa (2023)

O parâmetro de ajuste de escala k_{CS25} foi determinado por meio da minimização da soma dos quadrados dos desvios relativos entre as viscosidades cinemáticas calculadas pelo modelo (vjcalc) e os respectivos valores experimentais (vj^{exp}). A otimização foi realizada sem restrições, utilizando o método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) Não Linear, implementado no suplemento Solver do Microsoft Excel®. A função objetivo (FO) utilizada é dada por:

$$FO = \sum_j \left(\frac{{v_j}^{exp} - {v_j}^{calc}}{{v_j}^{exp}} \right)^2 \qquad \text{(Eq. 21)}$$

O desempenho do modelo foi avaliado por meio de indicadores estatísticos, incluindo a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o desvio relativo absoluto médio (AARD%) e o coeficiente de determinação (R^2), dados pelas equações (22) a (24).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(\nu_j{}^{exp} - \nu_j{}^{calc}\right)^2} \qquad \text{(Eq. 22)}$$

$$AARD(\%) = \frac{100}{n}\sum_{j=1}^{n}\left|\frac{\nu_j{}^{calc} - \nu_j{}^{exp}}{\nu_j{}^{exp}}\right| \qquad \text{(Eq. 23)}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_j^n\left(\nu_j{}^{exp} - \nu_j{}^{calc}\right)^2}{\sum_j^n\left(\nu_j{}^{exp} - \bar{\nu}^{exp}\right)^2} \qquad \text{(Eq. 24)}$$

Também foram determinados os valores dos desvios relativos para cada dado individual analisado:

$$\delta\nu(\%) = 100 \times \left(\frac{\nu_j{}^{calc} - \nu_j{}^{exp}}{\nu_j{}^{exp}}\right) \qquad \text{(Eq. 25)}$$

Nas referidas equações, n representa o número total de pontos experimentais ou calculados, enquanto o subscrito j indica um ponto de dado específico avaliado. A variável $\bar{\nu}exp$ corresponde à média aritmética dos valores experimentais de viscosidade do conjunto de dados considerado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o conjunto de dados avaliado, o ajuste global do modelo resultou em R^2 de 0,9803, AARD (%) global de 3,59 % e baixos valores para o RMSE (4,48x10-7 m2 s-1). Os valores calculados apresentaram, portanto, boa concordância com os dados experimentais, enquanto os valores de AARD (%) dos biodieseis individuais variaram de 1,81 % (macaúba) a 4,90 % (colza). Com relação aos desvios relativos, o maior valor obtido foi de 5,29 % para a viscosidade cinemática do biodiesel de colza a 353,15 K.

Com o mesmo objetivo, Pinto (2019) aplicou as equações UNIFAC-VISCO e GC-UNIMOD, ambas modelos de contribuição de grupos e utilizando diferentes funções objetivo, na predição da viscosidade cinemática do biodiesel de babaçu, utilizando também a composição reportada por Nogueira Jr. et al. (2010). Os valores de AARD (%) encontrados pela autora foram de 5,63 % a 6,38 % utilizando o modelo UNIFAC-VISCO, e 3,16 % a 4,43 % com o modelo GC-UNIMOD. Portanto, o modelo

GC-UNIMOD traz resultados análogos ao modelo aqui proposto, enquanto o modelo UNIFAC-VISCO apresentou desvios ligeiramente maiores. A mesma autora aplicou também estes modelos a outras amostras de biodiesel, encontrando desvios relativos médios na faixa de 0,96 % a 6,88 % quando o modelo UNIFAC-VISCO foi empregado e 0,88 % a 13,00 % quando ela utilizou o modelo GC-UNIMOD.

Por sua vez, Silva (2024) empregou um método de aprendizado de máquina para a predição da viscosidade cinemática e outras propriedades do biodiesel com base em sua composição de ácidos graxos, computando 136 amostras, das quais foram selecionadas 80% para treinamento do modelo e 20 % para teste. Nesse trabalho, o valor para o RMSE encontrado pela autora foi de aproximadamente 2,32x10-7 m2 s-1 e um R2 = 0,9970. Este resultado mostra a elevada capacidade do uso de aprendizado de máquina para a predição de propriedades. Entretanto, os resultados entre a presente abordagem e aquela baseada em aprendizado de máquina não são diretamente comparáveis, uma vez que foram empregados bancos de dados e estratégias de treinamento e teste distintos. A comparação evidencia, sobretudo, a diferença entre uma abordagem baseada em ajuste estatístico sobre um banco amplo e a formulação aqui proposta, que busca incorporar explicitamente uma interpretação termodinâmica e molecular ao cálculo da viscosidade em um modelo simples e com baixo custo computacional.

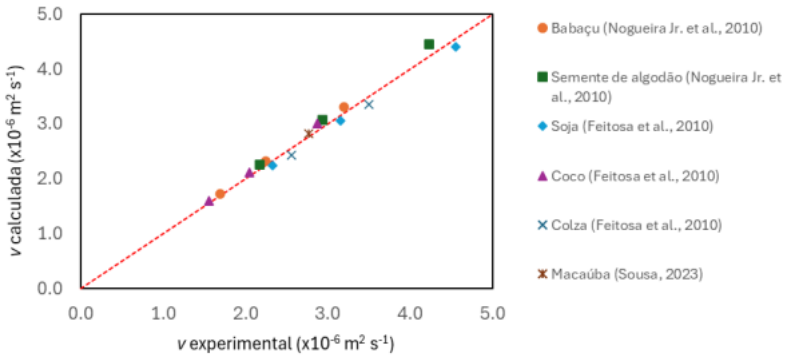
Ao confrontar os desvios obtidos nesta abordagem com a literatura compilada por Ferreira et al. (2021), evidencia-se o potencial do modelo Eyring-CS25. Em seu levantamento, métodos preditivos clássicos aplicados à viscosidade em condições de pressão atmosférica, exibiram desvios médios relativos sistemáticos que variam substancialmente entre 1,7 % e 14,6 %, apresentando tendência marcante de subestimar os valores reais do fluido, enquanto modelos modificados de alta performance alcançam desvios inferiores a 2,5 % à custa de calibrações empíricas rigorosas e dependência direta da viscosidade experimental prévia a 313 K.

O parâmetro de ajuste de escala kCS25 convergiu para o valor otimizado de 4,76 na minimização global da função objetivo. Na formulação adotada, esse valor representa o fator de escala efetivo que relaciona a energia de Gibbs em excesso calculada pelo CS25 à contribuição em excesso da energia de Gibbs de ativação viscosa. Dessa forma, o valor obtido para kCS25 fornece suporte à hipótese de proporcionalidade proposta na Equação (11) dentro do domínio de composição e temperatura investigado, estabelecendo uma ligação quantitativa entre uma propriedade termodinâmica de equilíbrio (ΔgE) e uma propriedade de transporte (Δg‡,E).

A consistência dessa hipótese é reforçada pela Figura 2, na qual se observa elevada concordância entre as viscosidades cinemáticas calculadas e experimentais para biodieseis obtidos de diferentes matérias-primas. A proximidade dos pontos em relação à reta identidade demonstra que a utilização de um único valor global de kCS25 produz boa representação do conjunto de dados nos sistemas e na faixa de temperatura investigados.

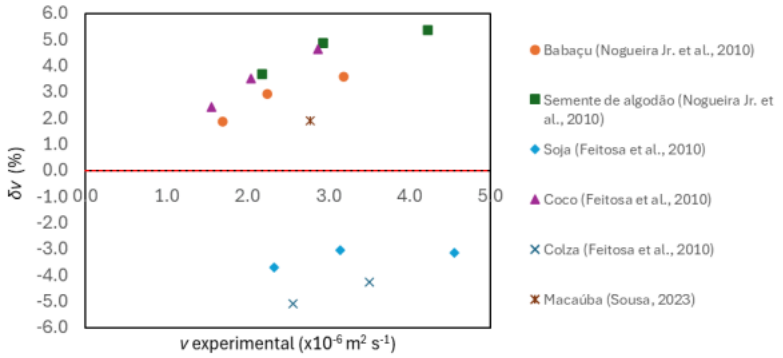
A análise dos desvios relativos (Figura 3), entretanto, fornece informações adicionais sobre o significado físico desse parâmetro. Embora os erros permaneçam reduzidos para todos os sistemas avaliados e não apresentem dependência evidente com a magnitude da viscosidade, observa-se um agrupamento dos resíduos em função da matéria-prima. Enquanto os biodieseis de babaçu, algodão, coco e macaúba apresentam desvios predominantemente positivos, os biodieseis de soja e colza apresentam desvios predominantemente negativos. Esse comportamento sugere que, embora um único valor médio de kCS25 seja suficiente para descrever adequadamente todas as misturas investigadas, variações do valor ótimo desse parâmetro podem existir em função da composição química do biodiesel.

Figura 2. Gráfico dos valores calculados vs valores experimentais publicados na literatura para os biodieseis estudados.



Fonte: Os autores.

Figura 3. Gráfico dos desvios relativos do modelo em relação aos dados experimentais publicados na literatura para os biodieseis estudados.

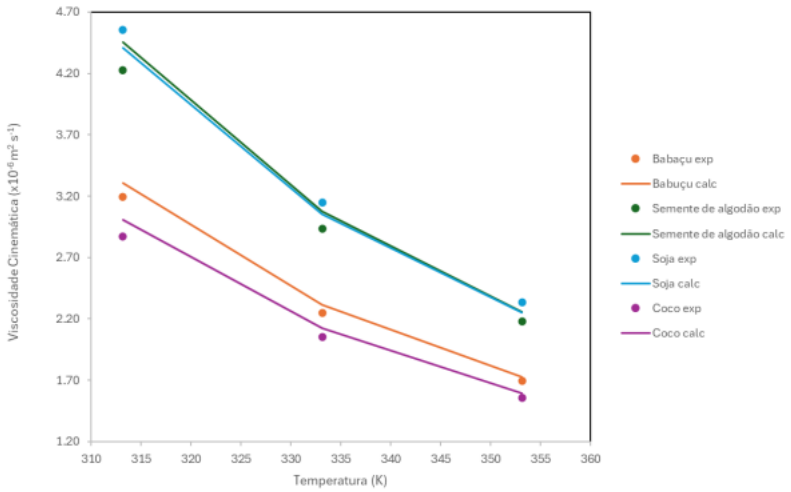


Fonte: Os autores.

Um aspecto particularmente interessante é que os biodieseis de soja e colza avaliados se distinguem dos demais por apresentarem frações molares apreciáveis de linolenato de metila (C18:3), da ordem de 8 % e 10 % em fração molar, respectivamente, enquanto esse componente está ausente (ou em quantidades desprezíveis) nas demais matérias-primas avaliadas. Assim, as tendências observadas nos resíduos podem indicar que alguma dependência secundária da composição molecular pode não estar sendo bem capturada pela hipótese de um valor independente para o parâmetro kCS25. Embora o conjunto de dados disponível ainda seja muito pequeno para estabelecer uma relação causal, essa observação levanta a hipótese para uma investigação futura envolvendo biodieseis com diferentes distribuições de ésteres graxos e graus de insaturação no sentido investigar se o grau de insaturação da mistura está associado a uma variação sistemática da relação entre a energia de Gibbs em excesso e a energia de Gibbs de ativação em excesso do fluxo viscoso.

Adicionalmente, a sensibilidade térmica do modelo Eyring-CS25, avaliada na Figura 4, demonstra aderência fenomenológica ao comportamento real de misturas líquidas. Observa-se o decrescimento da viscosidade com o aumento da temperatura. A concordância entre os valores calculados e experimentais, mesmo mantendo kCS25 constante, indica que a formulação adotada foi capaz de representar a dependência térmica observada para os sistemas investigados.

Figura 4. Gráfico dos valores experimentais e calculados pelo modelo Eyring-CS25 em função da temperatura para biodieseis selecionados



4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvida e avaliada uma abordagem para a predição da viscosidade cinemática de biodiesel, denominada Eyring-CS25, baseada na combinação da teoria da taxa absoluta de Eyring aos coeficientes de atividade calculados pelo modelo preditivo CS25. A formulação estabelece uma relação entre a energia de Gibbs em excesso e a energia de Gibbs de ativação em excesso do fluxo viscoso por meio de um parâmetro efetivo de ajuste de escala para incorporar diretamente os efeitos de não idealidade ao cálculo da viscosidade de misturas líquidas.

Para o conjunto de dados investigados, o ajuste global resultou em kCS25 = 4,76, AARD = 3,59% e R2 = 0,9803, indicando boa concordância entre os valores calculados e experimentais na faixa de temperatura e nos sistemas avaliados. Esses resultados mostram que um único parâmetro global pode ser utilizado para representar, com baixos desvios médios, os seis biodieseis considerados.

A análise dos desvios relativos mostrou ainda que o modelo mantém desempenho consistente ao longo de toda a faixa de viscosidades estudada, sem evidências de perda sistemática de capacidade preditiva em função da magnitude da viscosidade. Dessa forma, os resultados indicam potencial do modelo Eyring-CS25 para utilização estudos de simulação e avaliação preliminar de processos que dependem de estimativas da viscosidade de misturas de biodiesel, sujeito à validação para outros sistemas e condições operacionais. Apesar dos resultados favoráveis, a aplicação do modelo deve ser interpretada dentro do domínio de composição e temperatura investigado. O agrupamento observado

nos resíduos em função da matéria-prima sugere que o parâmetro de ajuste de escala kCS25, embora adequadamente representado por um único valor para os sistemas avaliados, pode apresentar dependência secundária da composição molecular, particularmente do grau de insaturação. A confirmação e a quantificação dessa possível dependência requerem conjuntos de dados mais amplos e diversificados, incluindo misturas com diferentes distribuições de ésteres graxos e maior número de sistemas independentes. Estudos futuros poderão, a partir desses dados, avaliar formulações mais gerais para a contribuição da não idealidade à energia de Gibbs de ativação viscosa e verificar a capacidade de generalização do modelo Eyring-CS25 para além das condições consideradas neste trabalho.

Por fim, ao disponibilizar um modelo fundamentado em princípios termodinâmicos para a estimativa da viscosidade de combustíveis renováveis, este trabalho contribui para o desenvolvimento de ferramentas capazes de apoiar a modelagem e a otimização de processos relacionados à produção e utilização de biodiesel. Nesse contexto, seus resultados encontram-se alinhados aos esforços voltados para a transição energética e para o uso mais eficiente de recursos, em consonância com o Compromisso pela Qualidade do Ar e Saúde Ambiental e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 7 (Energia Limpa e Acessível), 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal Catarinense - Campus Araquari e à Universidade Federal de Santa Catarina, em especial ao Departamento de Química, pelo apoio institucional, bem como a todos que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização e o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BOSSE, D.; BART, H. Viscosity Calculations on the Basis of Eyring's Absolute Reaction Rate Theory and COSMOSPACE. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 44, n. 22, p. 8428-8435, 2005.

BOUILLOT, B.; TEYCHENE, S.; BISCANS, B. An evaluation of COSMO-SAC model and its evolutions for the prediction of drug-like molecule solubility: Part 1. Industrial and Engineering Chemistry Research, v. 52, n. 26, p. 9276–9284, 2013.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Ministério da Saúde, Ministério das Cidades. Compromisso pela Qualidade do Ar e Saúde Ambiental. 2009. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/qualidade-do-ar/repositorio/plano-nacional-de-qualidade-do-ar. Acesso em: 26 jun. 2026.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Biodiesel. 2020. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel. Acesso em: 24 junho 2026.

CANTIANI, A. et al. CFD analysis of biodiesel combustion applied to industrial burners. Modelling, Measurement and Control C, v. 79, n. 3, p. 61-69, 2018

FEITOSA, F. X.; RODRIGUES, M. L.; VELOSO, C. B.; CAVALCANTE, C. L. ALBUQUERQUE, M. C. G.; SANT'ANA, H. B. Viscosities and Densities of Binary Mixtures of Coconut + Colza and Coconut + Soybean Biodiesel at Various Temperatures. Journal of Chemical & Engineering Data, v. 55, n. 9, p. 3909–3914, 2010.

FERRARINI, F.; FLÔRES, G. B.; MUNIZ, A. R.; SOARES, R. P. An open and extensible sigma-profile database for COSMO-based models. AIChE Journal, v. 64, n. 9, p. 3443-3455, 2018.

FERREIRA, A. G. M.; TALAVERA-PRIETO, N. M. C.; PORTUGAL, A. A.; MOREIRA, R. J. REVIEW: Models for predicting viscosities of biodiesel fuels over extended ranges of temperature and pressure. Fuel, v. 287, n. 119544, 2021.

FONTOURA, L. A. M.; SANTOS, S. J.; MARQUES, M. V. O biodiesel e as fontes de energia: contexto, química e tecnologia. 1. ed. Blumenau: Editora IFC, 2023.

GHATEE, M. H.; ZARE, M.; ZOLGHADR, A. R.; MOOSAVI, F. Temperature dependence of viscosity and relation with the surface tension of ionic liquids. Fluid Phase Equilibria, v. 291, n. 2, p. 188-194, 2010.

GERBER, R. P., SOARES, R. P. Prediction of Infinite-Dilution Activity Coefficients Using UNIFAC and COSMO-SAC Variants. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 49, n. 16, p. 7488-7496, 2010.

GRUNBERG, L., NISSAN, A. H. Mixture Law for Viscosity. Nature, v. 164, p. 799-800, 1949.

HAJ-KACEM, R. B.; ALZAMEL, N. O.; AL-OMAIR, N. A.; ALKHALDI, M. A.; AL-ARFAJ, A. A.; OUERFELLI, N. Sensitivity of Viscosity Arrhenius-Type Equation to Density of Liquids. Asian Journal of Chemistry, v. 28, n. 11, p. 2407-2410, 2016.

IHMELS, E. C.; GMEHLING, J. Densities of Toluene, Carbon Dioxide, Carbonyl Sulfide, and Hydrogen Sulfide over a Wide Temperature and Pressure Range in the Sub- and Supercritical State. Industrial and Engineering Chemistry Research, v. 40, n. 20, 2001.

KINCAID, J. F.; EYRING, H.; STEARN, A. E. The theory of absolute reaction rates and its application to viscosity and diffusion in the liquid state. Chemical Reviews, v. 28, n. 2, p. 301-365, 1941.

KLAMT, A.; SCHÜÜRMANN, G. COSMO: a new approach to dielectric screening in solvents with explicit expressions for the screening energy and its gradient. Journal of Chemical Society., Perkin Transactions 2, n. 5, p. 799–805, 1993.

LIN, S. T.; SANDLER, S. I. A Priori Phase Equilibrium Prediction from a Segment Contribution Solvation Model. Industrial and Engineering Chemistry Research, v. 41, n. 5, p. 899–913, 2002.

MATSUDA H.; TOCHIGI, K.; KURIHARA, K.; FUNAZUKURI, T.; RATTAN, V. K. Estimation of kinematic viscosities for multi-component systems using modified Eyring and activity coefficient model. Fluid Phase Equilibria, v. 492, p. 137-144, 2019.

NOGUEIRA JR., C. A.; FEITOSA, F. X.; FERNANDES, F. A. N.; SANTIAGO, R. S.; SANT'ANA, H. B. Densities and Viscosities of Binary Mixtures of Babassu Biodiesel + Cotton Seed or Soybean Biodiesel at Different Temperatures. Journal of Chemical & Engineering Data, v. 55, n. 11, p. 5305–5310, 2010.

NOVAK, L. Entity-Based Eyring−NRTL Viscosity Model for Mixtures Containing Oils and Bitumens. Industrial and Engineering Chemistry Research, v. 45, n. 21, p. 7329-7335, 2006.

ONODERA, N.; SAKABE, J.; FUNAZUKURI, T. Prediction of dynamic viscosities of carbon dioxide – organic solvent mixtures with combined equation of state and Eyring theory. The Journal of Supercritical Fluids, v. 177, p. 105345, 2021.

PINTO, C. N. Otimização de parâmetros para modelos baseados no conceito de contribuição de grupos aplicado ao cálculo de viscosidade de misturas não ideais. 2019. 184 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2019.

SILVA, A. D. Previsão das propriedades do biodiesel e seu perfil ideal de ácidos graxos por meio de aprendizado de máquina. 2024. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

SILVA, G. O.; SILVA JUNIOR, J. L. Estimativa dos parâmetros termodinâmicos de ativação viscosa de ésteres presentes no biodiesel utilizando um método teoricamente consistente. In: 31º Encontro de Química da Região Sul, 2025, Toledo, PR. Anais [...]. Toledo, PR: SBQSul, 2025.

SOARES, R. D. P.; FLÔRES, G. B.; XAVIER, V. B.; PELISSER, E. N.; FERRARINI, F.; STAUDT, P. B. LVPP sigma-profile database (18.07). Zenodo, 2017. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.3613786

SOARES, R. D. P.; MEJÍA-RODRIGUEZ, D.; APRÀ, E. Recent Improvements to the NWChem COSMO Module. Journal of Chemical Theory and Computation. v. 21, n. 22, p. 11573-11584, 2025.

SOARES, R. D. P. JCOSMO: A computational tool for modern quasi-chemical models. [S. I.]: JCOSMO. [s. d.]. Disponível em: https://lvpp.github.io/jcosmo-docs/. Acesso em: 29 jun. 2026.

SOUSA, B. A. Óleo da Semente de Macaúba (Acrocomia aculeata): Extração, Obtenção de Biodiesel e Caracterização da Conversão e Viscosidade Cinemática. 2023. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

Capítulo 19

10.37423/260911415

DESENVOLVIMENTO DE LICOR UTILIZANDO A FRUTA PITAYA

Bernardo Genti Schimidt — *Universidade Comunitária da Região de Chapecó UNOCHAPECÓ*

Gabriel Fante — *Universidade Comunitária da Região de Chapecó UNOCHAPECÓ*

Gustavo Henrique Bazi — *Universidade Comunitária da Região de Chapecó UNOCHAPECÓ*

Regnier Antonio Rodriguez Marcano — *Universidade Comunitária da Região de Chapecó UNOCHAPECÓ*

Murilo Heitor Ahlert — *Universidade Comunitária da Região de Chapecó UNOCHAPECÓ*

RESUMO

Quem diria que a exótica pitaya poderia dar origem a um licor tão saboroso e promissor? Nossa pesquisa explorou o potencial dessa fruta tropical para criar uma bebida única e que agradasse ao paladar dos brasileiros. A pitaya, com sua cor vibrante e sabor adocicado, tem conquistado cada vez mais espaço nas prateleiras de supermercados e em feiras, deste modo estando com mais frequência em nossas mesas, assim, pensamos, por que não transformar essa fruta em um licor? Afinal, o Brasil é um país apaixonado por bebidas exóticas e a pitaya aliada às suas características, tem tudo para se tornar uma estrela nesse nicho de mercado. Para criar o licor desejado, utilizamos a polpa da fruta em sua forma mais pura, sem adição de conservantes ou corantes artificiais, pois queríamos um produto natural, saboroso e que atendesse até os consumidores mais exigentes. Desenvolveu-se diferentes combinações, adicionando, maracujá, morango, abacaxi e outras frutas, sempre buscando o equilíbrio perfeito entre doçura e acidez. Os resultados foram surpreendentes! O licor conquistou os nossos paladares e dos pré avaliadores que participaram da degustação. A cor vibrante da fruta se manteve no licor, o aroma era irresistível e o sabor, uma verdadeira explosão tropical. Além disso, a produção do licor mostrou-se economicamente viável, o que significa que podemos ter um novo produto brasileiro de sucesso nas prateleiras. Acreditamos que o licor de pitaya tem um futuro promissor, pode abrir portas para novos mercados, tanto no Brasil, quanto no exterior, e fortalecer a cadeia produtiva da fruta. Além disso, por utilizar um ingrediente natural e nutritivo como a pitaya, estamos oferecendo aos consumidores uma opção mais saudável e saborosa dentro do universo das bebidas alcoólicas. Com este estudo, esperamos contribuir para a valorização da pitaya e para o desenvolvimento de novos produtos brasileiros de alta qualidade, afinal, a gastronomia é um setor criativo e em constante evolução, e a pitaya tem muito a oferecer para os amantes de bebidas especiais.

Palavras-Chave: Licor, Pitaya, Cachaça, Bebida alcoólica, Análise Sensorial.

1 INTRODUÇÃO

O termo "licor" deriva das palavras latinas liquifacere e liquore, que significam "tornar líquido" e "líquido", respectivamente, Śliwińska et al. (2015). desde tempos antigos, os licores foram apreciados não apenas como bebidas alcoólicas, mas também como remédios, carregando uma rica herança cultural e medicinal. Durante os séculos XVIII e XIX, os licores desempenharam um papel importante na medicina, sendo prescritos por médicos e boticários. Essas bebidas eram feitas a partir de misturas complexas de ervas, especiarias, flores e frutas, muitas vezes usando aguardente ou vinho como base. Esses elixires medicinais eram utilizados para tratar uma variedade de doenças, reforçando a percepção dos licores como substâncias benéficas e multifuncionais (Siqueira et al., 2021).

No contexto brasileiro, a introdução dos licores remonta ao século XVI, com a chegada dos colonizadores portugueses, (Albino Barbosa, 2016) estes trouxeram consigo suas tradições e práticas culturais, incluindo o consumo de licores. A produção de licor no Brasil foi impulsionada pela abundância de cana-de-açúcar, cultivada extensivamente nos engenhos e trabalhada pelos escravos. A cachaça, derivada da cana-de-açúcar, tornou-se um ingrediente central na fabricação de licores, estabelecendo uma conexão duradoura entre a história da bebida e a economia colonial brasileira. Além disso, a tradição de fermentação alcoólica já existia entre as culturas indígenas brasileiras, (Pereira, 2019), como exemplificado pela bebida chamada cauim. Feito a partir da fermentação da mandioca ou do milho, frequentemente misturados com sucos de frutas, o cauim apresenta uma composição bastante similar aos licores, sendo consumido em celebrações e rituais sociais, como o nascimento de uma nova criança na comunidade.

Nos últimos anos, o consumo global de frutas exóticas tem experimentado um crescimento expressivo, refletindo uma mudança nos padrões de consumo, onde os consumidores buscam experiências novas, sabores únicos e produtos saudáveis. De acordo com Turap et al. (2022), Frutas exóticas, com suas cores vibrantes e sabores distintos, têm conquistado um espaço cada vez maior tanto no mercado interno quanto no internacional. Entre essas frutas, a pitaya vermelha (Hylocereus costaricensis) se destaca por suas características singulares. Também conhecida como Dragon Fruit ou Fruta-do-Dragão, a pitaya é originária das florestas tropicais da América e pertence à família Cactácea. Sua aparência marcante, combinada com um perfil nutricional rico, a tornou uma das frutas mais desejadas nos mercados de todo o mundo. A pitaya não apenas atrai os consumidores por seu visual exótico, mas também pelos benefícios à saúde, como a presença de antioxidantes, fibras e vitaminas essenciais, (Oliveira Junior et al., 2021).

A rusticidade e versatilidade da pitaya a tornam uma fruta promissora para diversas aplicações, incluindo a produção de licores. A combinação da tradição dos licores com a inovação trazida pelo uso de ingredientes exóticos como a pitaya reflete uma tendência crescente no mercado de bebidas: a valorização de produtos artesanais, naturais e que ofereçam algo além do consumo tradicional. Ao explorar o potencial da pitaya na produção de licor, este estudo pretende não apenas criar um produto diferenciado, mas também agregar valor à cadeia produtiva da fruta no Brasil. A pitaya, cultivada principalmente em regiões tropicais e subtropicais, oferece uma oportunidade única para os produtores brasileiros se destacarem em um mercado global cada vez mais competitivo, (Umiyati, 2021).

Além disso, o desenvolvimento de novos produtos como o licor de pitaya pode contribuir para a diversificação da oferta de bebidas alcoólicas no Brasil, ajudando a fortalecer a economia local e promover a sustentabilidade agrícola. A criação de um licor que combine a herança cultural dos licores com a modernidade e os benefícios nutricionais da pitaya pode atender à demanda de um público cada vez mais exigente, que busca produtos autênticos e de alta qualidade (Pio et al., 2022).

Após a elaboração de um produto alimentício, a análise sensorial é realizada uma ferramenta que determina a aceitação do referido produto. A análise sensorial utiliza como instrumento de medida os cinco sentidos humanos, visão, olfato, paladar, tato e audição. sendo que o primeiro contato do consumidor com os produtos e através da visão, assim analisar sua cor; e através do olfato avalia o aroma, através de algumas substâncias voláteis do produto. Rivki et al. (2019) descrevem que, ao ingerir alimentos, é possível sentir o gosto e a textura por meio do paladar, além de ouvir o som produzido ao mastigar ou engolir. Dessa forma, torna-se necessária a aplicação de análises sensoriais com provadores para simular a percepção sensorial real dos consumidores.

O desenvolvimento de um licor artesanal a partir da pitaya visa não apenas criar uma bebida saborosa e diferenciada, mas também valorizar as propriedades únicas dessa fruta, que é rica em antioxidantes, vitaminas e minerais. Ao explorar as características sensoriais, como sabor, aroma e cor, o projeto busca realçar a essência da pitaya, aromatizando com diferentes tipos de frutas, aliado ao sabor da cachaça nacional, deste modo, criando uma experiência única.

Além disso, o licor pretende ser uma opção sofisticada para o mercado de bebidas artesanais, alinhando qualidade com benefícios nutricionais. A pesquisa também envolve o estudo dos métodos de produção, fermentação e maturação, garantindo que o produto mantenha a integridade dos

componentes da pitaya, ao mesmo tempo em que atinge um equilíbrio ideal entre doçura, acidez, consistência e teor alcoólico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A produção dos licores foi realizada no Laboratório de Tecnologia de Alimentos e de Análises Físico-Químicas, localizados no Bloco C1 da Universidade Comunitária da Região de Chapecó (Unochapecó). Foram desenvolvidos quatro modelos de licor, cada um com uma composição específica de frutas, teor alcoólico e xarope de açúcar, visando a obtenção de diferentes perfis sensoriais e teores de dulçor.

2.1 Materiais utilizados

Para cada modelo de licor, foram utilizadas frutas selecionadas, cachaça com 39% de teor alcoólico e xarope de açúcar, obtido pela mistura de sacarose e água. Abaixo, descrevem-se as formulações de cada modelo, na Tabela 1:

Tabela 1 – Modelos de licores de pitaya

Formulação	Polpa da Fruta (g)	Polpa da Pitaya (g)	Graduação Alcoólica (°GL)	Concentração de xarope (ml)
Modelo 1	50	70	39	65
Modelo 2	50	70	39	100
Modelo 3	50	70	39	100
Modelo 4	60	70	39	65

Fonte: Autores, 2024.

Modelo 1: Contém 70 g de pitaya branca e 50 g de maracujá, adicionados a 200 ml de cachaça com 39% de teor alcoólico. O xarope utilizado possui 65 ml, preparado pela dissolução de 100 g de açúcar em 100 ml de água. Este modelo busca um sabor balanceado entre o dulçor do xarope e o leve toque ácido do maracujá.

Modelo 2: Formulação composta por 70 g de pitaya roxa, 25 g de amoras e 25 g de mirtilo, imersos em 215 ml de cachaça com 39% de teor alcoólico. A solução de xarope possui 100 ml, preparada com 200

g de açúcar e 200 ml de água, conferindo um teor de dulçor mais elevado para balancear a acidez das frutas vermelhas.

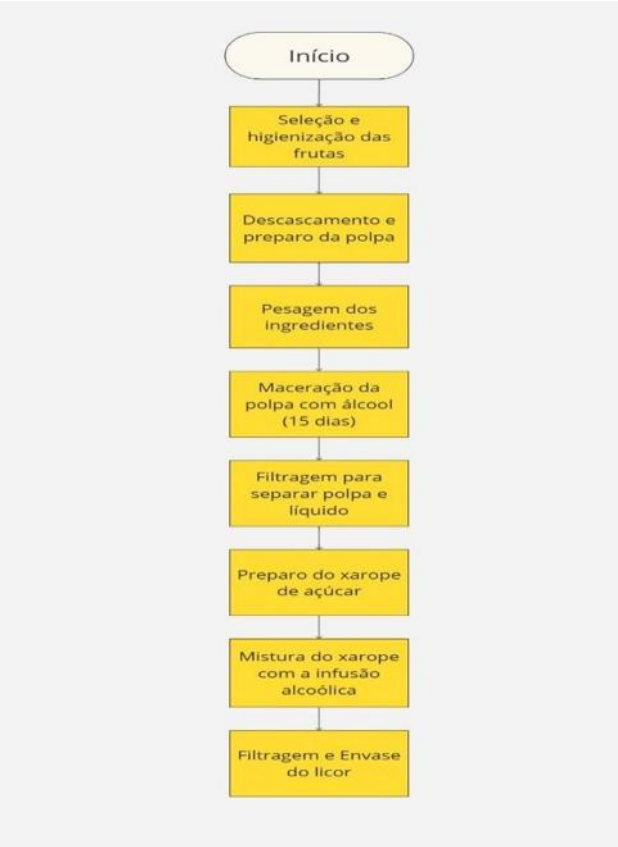
Modelo 3: Neste modelo, foram utilizados 70 g de pitaya branca e 50 g de abacaxi, combinados com 180 ml de cachaça com 39% de teor alcoólico. O xarope empregado tem volume de 100 ml, obtido pela dissolução de 200 g de açúcar em 200 ml de água. O abacaxi proporciona uma nota ácida e refrescante ao produto.

Modelo 4: Contendo 70 g de pitaya roxa e 15 g de cada, fruta vermelha variadas (morango, amoras, framboesa e mirtilo), este modelo é preparado com 180 ml de cachaça com 39% de teor alcoólico e 65 ml de xarope (100 g de açúcar dissolvidos em 100 ml de água). Esta formulação possui um perfil levemente ácido e adocicado, com destaque para o aroma das frutas vermelhas.

2.2 MÉTODO DE PRODUÇÃO

O processo de produção dos licores iniciou com a etapa de higienização das frutas, conforme apresentado no fluxograma do processamento do licor de pitaya (Figura 1). As frutas foram escolhidas pela intuição, levando em consideração o grau de maturação e a aparência visual. Primeiramente, foi realizada uma pré-lavagem, imergindo as frutas em água corrente potável para eliminar sujeiras superficiais. Após essa imersão, as frutas foram enxaguadas novamente em água corrente para garantir a remoção de resíduos restantes. Em seguida, procedeu-se ao descascamento e à desintegração da polpa da pitaya, preparando-a para as etapas seguintes do processo de produção.

Figura 1: Fluxograma do processamento de licor de pitaya.



Fonte: Autores, 2024.

Na etapa de maceração da polpa de pitaya, previamente pesada, em conjunto com outras frutas selecionadas (como maracujá, abacaxi ou frutas vermelhas, conforme a formulação de cada modelo). A polpa de pitaya e as frutas adicionais foram colocadas em um Becker de 500 ml, ao qual foram adicionados 200 ml de cachaça com 39% de teor alcoólico. Após a mistura inicial dos ingredientes, a solução foi transferida para um recipiente com tampa para garantir o isolamento da solução durante o processo de maceração. O recipiente foi armazenado em temperatura ambiente e mantido em repouso por 15 dias, tempo necessário para que ocorresse a extração dos compostos bioativos e aromáticos presentes nas frutas mostrado na Figura 2.

Figura 2: Modelo 1 em maceração.



Fonte: Autores, 2024.

Ao término do período de maceração, a mistura foi filtrada para separar a polpa do líquido, que é a infusão alcoólica com os extratos da pitaya e das demais frutas utilizadas como pode se observar na figura 3. A etapa de filtragem assegura a remoção de resíduos sólidos que possam interferir na textura e na qualidade sensorial do produto.

Figura 3 - Filtragem e adicionamento do xarope.

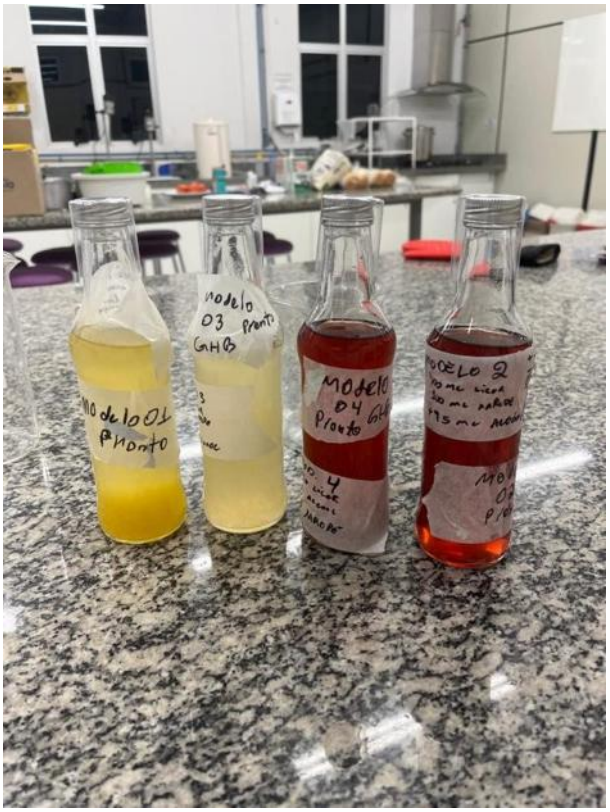


Fonte: Autores, 2024.

O xarope utilizado para adoçar o licor foi preparado de acordo com as proporções descritas em cada modelo, utilizando partes iguais de açúcar e água potável. A água foi aquecida até fervura para assegurar a completa dissolução do açúcar e garantir a obtenção de uma solução homogênea. Após o resfriamento, o xarope foi incorporado ao líquido previamente filtrado da infusão alcoólica. Essa adição visa o equilíbrio do dulçor, contribuindo para a harmonização do perfil sensorial do licor.

A fase final do processamento do licor envolve o repouso da mistura, resultando em um produto com características sensoriais e físicas padronizadas. Após essa etapa, o licor é submetido a uma nova filtragem e envasado em recipientes de vidro estéreis ilustrado na figura 4, o que preserva sua qualidade e segurança microbiológica até o momento do consumo.

Figura 4: Licor já embasado.



Fonte: Autores, 2024.

2.3 METODOLOGIA DE PESQUISA

A presente pesquisa caracteriza-se como pesquisa aplicada, pois busca gerar conhecimento prático para a solução de problemas reais, com foco na introdução de um novo produto no mercado de bebidas alcoólicas artesanais. O licor de pitaya é desenvolvido como uma alternativa inovadora e saudável, utilizando a pitaya, uma fruta exótica, para atender à crescente demanda por bebidas

diferenciadas (SOUZA et al., 2020). Este estudo se concentra em aplicar novas formulações dentro do nicho de licores artesanais, um segmento que ainda carece de opções inovadoras, especialmente no que se refere ao uso de frutas menos convencionais no processo de produção (FERREIRA, 2019).

A pesquisa tem natureza exploratória, com o propósito de expandir o conhecimento sobre o tema e identificar regularidades, soluções ou paradigmas diferentes em relação ao desenvolvimento do licor; de fato, busca-se entender quais variáveis determinantes influenciam a aceitação sensorial e a qualidade do licor (OLIVEIRA et al., 2021). Este projeto, que analisa possíveis soluções de formulações do licor de pitaya a partir de suas combinações, potencializa o conhecimento para investigações envolvendo temas similares, bem como insere-se no mercado de bebidas alcoólicas do tipo craft (SILVA, 2023). Deste modo, considera-se a viabilidade das combinações da pitaya com morango, maracujá, amora e mirtilo.

A pesquisa é qualiquantitativa, pois envolve aspectos qualitativos e quantitativos. O elemento qualitativo pode ser do ponto de vista da avaliação sensorial do licor, já que permite a compreensão e a identificação das preferências e expectativas adotadas pelos participantes (PIRES et al., 2018). Por outro lado, é quantitativo por meio de testes sensoriais estruturados, o que possibilita a medição de dados objetivos relacionados à aceitação e características das formulações do licor (GONÇALVES et al., 2020). A partir da combinação, será possível criar uma análise complementar que forneça ao produto insights importantes e processe as variáveis que atraem ou fazem os alunos recusarem a compra.

O procedimento adotado é classificado como experimento, pois as variáveis relacionadas à formulação do licor de pitaya, como a concentração de cachaça, a quantidade de xarope de açúcar e a combinação de várias frutas, são variadas para manter os efeitos delas nas propriedades sensoriais do licor em questão (PEREIRA, 2019). O método experimental permite controlar e ajustar as variáveis independentes relacionadas com interesse e observar o efeito direto sobre o produto e as propriedades sensoriais tais como sabor, aroma, cor e textura (ALMEIDA, 2017). Em outras palavras, pretende-se otimizar a formulação do licor de modo que seja geralmente aceitável.

Além dos testes sensoriais, a pesquisa também inclui análises laboratoriais para avaliar aspectos químicos do licor. Entre os parâmetros analisados, destacam-se o pH e o teor alcoólico do produto. O pH foi medido para garantir a estabilidade e segurança microbiológica do licor, além de verificar o equilíbrio ácido da bebida, o que pode influenciar diretamente o sabor e a preservação do produto. O

pH foi determinado utilizando um medidor de pH digital, com amostras retiradas ao longo do processo de produção (após a maceração e fermentação) e durante o envelhecimento (COSTA et al., 2018).

O teor alcoólico do licor foi medido utilizando um densímetro de bancada, uma ferramenta precisa para determinar a densidade do líquido, a partir da qual é possível calcular a concentração de etanol na bebida. O densímetro de bancada foi utilizado para medir a densidade das amostras do licor, e, a partir dessa medida, foi possível calcular o teor alcoólico do produto, garantindo que o nível de álcool estivesse de acordo com as especificações do produto (LOPES, 2016). O uso do densímetro de bancada permite uma medição exata e eficiente, fundamental para garantir a consistência e a qualidade do licor ao longo das diferentes formulações.

A coleta de dados é realizada por meio de uma metodologia diversificada. A metodologia experimental é o principal método utilizado, pois envolve a manipulação direta das variáveis associadas à formulação do licor, como as proporções de frutas, cachaça e xarope de açúcar (RAMOS, 2019). A variação dessas variáveis é essencial para entender como elas afetam a qualidade sensorial do produto. Além disso, a pesquisa recorre a métodos estatísticos para analisar os dados quantitativos obtidos nos testes sensoriais. A avaliação da aceitação sensorial do licor inclui atributos como sabor, aroma, cor e textura, que são analisados para permitir uma interpretação objetiva dos resultados e a identificação de padrões ou diferenças significativas entre as formulações (SANTOS et al., 2017). Esses métodos contribuem para uma análise precisa sobre o comportamento do produto e orientam decisões relacionadas à produção e comercialização do licor.

Assim entende-se que a pesquisa visa, por meio de uma abordagem integrada e robusta, fornecer insights inovadores para a produção de bebidas alcoólicas artesanais. A combinação de um procedimento experimental com a coleta e análise de dados qualitativos e quantitativos oferece uma visão aprofundada sobre as possibilidades de desenvolvimento do licor de pitaya, atendendo à crescente demanda por produtos diferenciados e de alta qualidade no mercado de bebidas (SILVA, 2023).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 DESENVOLVIMENTO SENSORIAL E COMPOSIÇÃO DOS LICORES

A produção dos quatro modelos de licor de pitaya, utilizando frutas variadas como maracujá, morango, abacaxi, amoras, framboesa e mirtilo, resultou em produtos com perfis sensoriais distintos, ajustados pelo uso de álcool e xaropes específicos para cada modelo. A formulação e o processo de maceração promoveram uma boa extração dos compostos aromáticos e bioativos das frutas, evidenciado por um aroma agradável e uma coloração que variou entre o rosa claro e o roxo, dependendo do tipo de pitaya (branca e roxa) e das frutas complementares utilizadas.

O ajuste na proporção de álcool e xarope permitiu criar variações de dulçor e acidez entre os modelos. Modelos que incluíram frutas de alta acidez, como maracujá e abacaxi, mostraram-se bem equilibrados com um teor maior de xarope, enquanto as formulações com frutas mais adocicadas, como morango e amoras, resultaram em licores com um sabor mais suave e um teor de açúcar ajustado para evitar excessos.

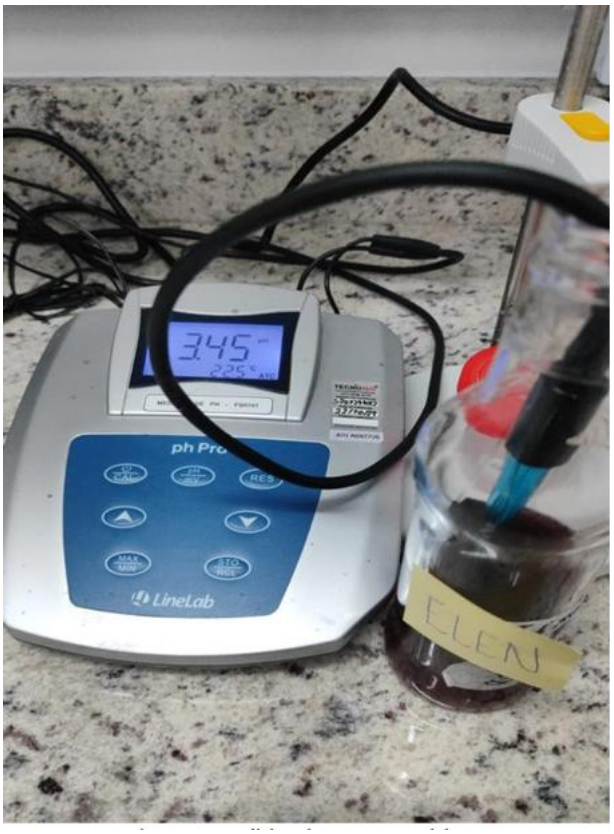
3.2 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Com o intuito de caracterizar os licores, foram avaliados os parâmetros de extrato, pH e teor alcoólico, para obter as análises que caracterizam os mesmos foram utilizados os seguintes equipamentos: para medir o pH um medidor de pH da bancada, pH PRO da marca Linelab. Já para medir os parâmetros de extrato e teor alcoólico foi utilizado um densímetro de bancada, o Density Meter DMA 4501. Como a precisão equipamentos é de suma confiança permitiu-se obter uma análise detalhada da composição do nosso produto.

3.2.1 pH

As medições de pH indicaram uma leve acidez nos licores, especialmente nos modelos que utilizam frutas ácidas como o maracujá e o abacaxi. Os valores de pH medidos situaram-se dentro da faixa esperada para bebidas alcoólicas, entre 3,45 e 4,0, garantindo um produto sensorialmente equilibrado e com acidez moderada, que contribui para a preservação do licor. Na figura 4 observamos a medição apresentada nos modelos 2 e 4.

Figura 5 Medidor de pH no modelo 4



Fonte: Autores 2024

3.2.2 TEOR ALCOÓLICO (% V/V)

O teor alcoólico, medido em (% v/v), revelou a adequação da proporção de álcool utilizada para cada modelo, sendo esse teor de 18%. O teor alcoólico apresentado garante a preservação do licor e a percepção de uma leve sensação de aquecimento ao paladar, sem comprometer o sabor das frutas. A utilização de cachaça com teor alcoólico de 39% em cada formulação permite uma extração eficiente dos compostos aromáticos e bioativos das frutas, contribuindo para o sabor e a longevidade do produto, pode se observar na figura 6.

Figura 6: Análises do teor de álcool do licor



Fonte: Autores 2024

3.2.3 EXTRATO

As medições do extrato de um licor, obtidas por um densímetro de bancada, oferecem informações fundamentais sobre a composição e qualidade final do nosso licor. O extrato original, medido em 40,58 graus Plato, reflete a densidade do mosto inicial e indica um alto teor de açúcares fermentáveis. Por outro lado, o extrato real, que é de 18,4% m/m, revela a quantidade de matéria solúvel presente após os processos de fermentação e destilação, sendo crucial para a avaliação da concentração de sólidos solúveis no produto. Já o extrato aparente, de 13,15% m/m, representa a densidade do líquido, incluindo a influência do álcool, que dilui os sólidos, resultando em uma medida menor do que o extrato real. Estas medições são essenciais para garantir a consistência e a qualidade do licor, proporcionando um entendimento detalhado de sua composição física e química.

3.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos confirmam que as variações nas formulações permitiram criar perfis sensoriais distintos, mantendo a qualidade físico-química dentro dos parâmetros adequados para licores. O equilíbrio entre acidez, dulçor e teor alcoólico proporcionou um produto agradável ao paladar, com potencial para aceitação no mercado de bebidas alcoólicas artesanais. A variação de frutas e

proporções de xarope entre os modelos também permitiu obter diferentes intensidades de aroma e sabor, o que pode ser explorado como um diferencial de produto.

A metodologia utilizada, incluindo a maceração e o preparo do xarope, foi eficaz na extração dos compostos desejados e na estabilização do licor, atendendo aos critérios de segurança e qualidade microbiológica. A utilização de equipamentos adequados e o respeito às normas de controle de qualidade, como o uso de soluções-tampão para calibração e medição de pH, garantiram a precisão e a confiabilidade dos resultados.

Esse estudo destaca a importância de ajustar os parâmetros de produção de acordo com as características de cada fruta, permitindo desenvolver produtos personalizados com alto valor agregado. Além disso, as análises físico-químicas realizadas corroboram a viabilidade de produção de licores a partir de pitaya e outras frutas, com potencial de expansão para novos sabores e variações futuras.

4 CONCLUSÕES

A elaboração de licores utilizando pitaya (tanto a branca quanto a roxa) e frutas adicionais (como maracujá, abacaxi, morango, amoras, framboesa e mirtilo) mostrou-se uma alternativa promissora, resultando em um produto com excelente qualidade sensorial. As diferentes formulações, com suas proporções específicas de frutas, álcool e xarope, possibilitaram o desenvolvimento de licores com perfis diversos, que atendem a várias preferências de consumo. O processo de maceração, seguido pela incorporação do xarope e um período de descanso, facilitou a extração e harmonização dos compostos bioativos e aromáticos, assegurando um sabor e aroma agradáveis.

As avaliações físico-químicas efetuadas, incluindo a medição de sólidos solúveis, pH, teor alcoólico e acidez total, foram fundamentais para padronizar os produtos, assegurando a qualidade e a segurança microbiológica do licor. Os dados coletados mostram que a inclusão da pitaya como ingrediente principal, junto com outras frutas, não apenas melhora o perfil sensorial do licor, mas também favorece a estabilidade do produto.

Este trabalho ressalta a oportunidade que os licores de pitaya e outras frutas possuem no segmento de bebidas artesanais, evidenciando a chance de introduzir novos sabores e formatos. A criação dessas

receitas apresenta uma opção atrativa, promovendo o uso de ingredientes naturais e permitindo inovações no mercado de bebidas alcoólicas.

AGRADECIMENTO

Somos gratos à Universidade Comunitária da Região de Chapecó (Unochapecó), particularmente às docentes Vaniele Bugoni Martins e Aline Olm de Francisco Rossi, pelo suporte acadêmico e orientação prestados durante a realização deste projeto. O seu vasto conhecimento e dedicação foram cruciais para tornar nossa ideia concreta.

Também expressamos nossa gratidão aos técnicos de laboratório, que nos ofereceram um apoio valioso na etapa prática, nos ajudando a manusear os equipamentos e a assegurar a segurança durante o procedimento. A participação de todos foi crucial para o êxito desta viagem, assim como a todas as pessoas que participaram diretamente ou indiretamente do processo.

REFERENCIAS

ALBINO BARBOSA, J. L. V. V:\SciELOLivros\books\eduepb\VIII Reunião\eng_can_acu_par\epub. EDUEPB, 2016.

ALMEIDA, F. R. PRINCÍPIOS DE EXPERIMENTAÇÃO EM BEBIDAS. São Paulo: Editora de Bebidas, 2017.

COSTA, M. J.; SILVA, P. L.; OLIVEIRA, R. A. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS EM BEBIDAS ALCOÓLICAS. Campinas: Editora Acadêmica, 2018.

FERREIRA, Cláudia. TECNOLOGIA DE BEBIDAS FERMENTADAS. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Técnica, 2019.

GONÇALVES, L. P.; FERREIRA, A. B.; SANTOS, M. E. ESTUDOS SENSORIAIS EM BEBIDAS. Rio de Janeiro: Editora de Sensores, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE FRUTAS (IBRAF). O POTENCIAL DA PITAYA NO MERCADO BRASILEIRO. Disponível em: https://www.ibraf.org.br/pitaya-potencial-mercado. Acesso em: 15 ago. 2024.

LOPES, J. M. DENSIDADE E TEOR ALCOÓLICO EM BEBIDAS. Recife: Editora de Química, 2016.

OLIVEIRA JUNIOR, M. A. DE; DOCEMA, M. L.; SILVA, M. S. C. DA; SOUZA, M. W. R. DE. PERFIL DO CONSUMO E CONHECIMENTO SOBRE FRUTEIRAS NATIVAS E EXÓTICAS. Research, Society and Development, v. 10, n. 13, p. e579101321377, 2021.

PEREIRA, V. C. DESENVOLVIMENTO DE LICORES ARTESANAIS. Brasília: Editora de Bebidas, 2019.

PEREIRA, V. C. O LUGAR DO TABACO: CACHIMBO E XAMANISMO MBYA

GUARANI. Revista de Antropologia, v. 62, n. 2, p. 323–349, 2019. Disponível em: https://www.revistas.usp.br/ra/article/view/161082. Acesso em: 07 nov. 2024.

PIRES, A. F.; ALMEIDA, L. M.; SOUZA, R. J. AVALIAÇÃO SENSORIAL: MÉTODOS E APLICAÇÕES. Porto Alegre: Editora de Alimentos, 2018.

RAMOS, H. G. METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS EM ALIMENTOS. Belo Horizonte: Editora Experimental, 2019.

SANTOS, D. C.; MENEZES, F. L.; OLIVEIRA, S. D. ANÁLISES ESTATÍSTICAS EM ESTUDOS SENSORIAIS. Curitiba: Editora Estatística, 2017.

SIQUEIRA, J. H.; SANTANA, N. M. T.; PEREIRA, T. S. S.; et al. CONSUMO DE BEBIDAS ALCOÓLICAS E NÃO ALCOÓLICAS: RESULTADOS DO ELSA-

BRASIL. Ciência & Saúde Coletiva, v. 26, n. suppl 2, p. 3825–3837, 2021. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S141381232021001603825&tlng=pt. Acesso em: 07 nov. 2024.

SILVA, João. ESTUDO DA VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE LICORES ARTESANAIS DE FRUTAS TROPICAIS. Revista Brasileira de Tecnologia de Alimentos, v. 10, n. 3, p. 45-58, 2023.

ŚLIWIŃSKA, M.; WIŚNIEWSKA, P.; DYMERSKI, T.; WARDENCKI, W.; NAMIEŚNIK, J. THE FLAVOUR OF FRUIT SPIRITS AND FRUIT LIQUEURS: A REVIEW. Flavour and Fragrance Journal, v. 30, n. 3, p. 197–207, 2015. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ffj.3237. Acesso em: 07 nov. 2024.

Capítulo 20

10.37423/260911418

A CADEIA DO PETRÓLEO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA PROCESSOS, IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS E PERSPECTIVAS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Calisto Nonato Silva Junior — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

Yasmin Nascimento da Silva — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

Vera Lucia da Silva Farias — *Universidade Estadual de Minas Gerais*

Adriana Cristina Silva — *Universidade Estadual de Minas Gerais*

Glauco Antônio de Queiroz Filho — *Instituto de Desenvolvimento Humano Superah*

RESUMO

O petróleo permanece entre as fontes de maior relevância para a economia e para o abastecimento energético mundial, sobretudo nos transportes, na indústria e na produção de insumos petroquímicos. Ao mesmo tempo, sua natureza não renovável e as emissões associadas à cadeia produtiva e ao uso de seus derivados colocam o setor no centro do debate sobre mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável. Este capítulo analisa a cadeia do petróleo sob a perspectiva da Engenharia, abrangendo formação e composição, exploração, produção, transporte, refino, petroquímica, inserção energética e desempenho ambiental. A abordagem consiste em revisão bibliográfica e documental apoiada por dados oficiais referentes a 2025. O pré-sal brasileiro é discutido como estudo de caso, considerando produtividade, receitas, operação em águas profundas e oportunidades de redução de emissões. A análise indica que eficiência energética, controle de metano, reinjeção de dióxido de carbono, eletrificação e captura de carbono podem reduzir impactos operacionais, mas não eliminam as emissões resultantes da combustão dos derivados. Conclui-se que a Engenharia possui papel duplo: melhorar a segurança e o desempenho da infraestrutura existente e redirecionar competências de processos para biorrefinarias, hidrogênio de baixa emissão, circularidade e outras cadeias industriais de menor intensidade de carbono.

Palavras-chave: petróleo; Engenharia Química; refino; pré-sal; impactos ambientais; transição energética.

1 INTRODUÇÃO

O petróleo foi um dos elementos centrais da industrialização contemporânea. A combinação entre elevada densidade energética, facilidade relativa de transporte, possibilidade de armazenamento e ampla variedade de derivados consolidou seu uso em veículos, máquinas, processos térmicos e cadeias petroquímicas. Gasolina, óleo diesel, querosene de aviação, gás liquefeito de petróleo, lubrificantes, asfaltos, solventes e nafta são exemplos de produtos que sustentam atividades econômicas e serviços essenciais. Essa versatilidade explica por que a substituição do petróleo é mais complexa do que a simples troca de uma fonte de geração elétrica por outra (IEA, 2025b; Speight, 2014).

A relevância econômica, entretanto, convive com impactos ambientais de grande escala. A combustão dos derivados converte o carbono presente nos hidrocarbonetos em dióxido de carbono, enquanto as etapas de produção, processamento e transporte podem liberar metano, compostos orgânicos voláteis, óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre e material particulado. Derramamentos, água produzida, cascalhos de perfuração, efluentes de refinaria, resíduos perigosos e passivos de desativação acrescentam riscos aos ecossistemas e às populações. Por isso, a sustentabilidade do setor não pode ser avaliada apenas pela eficiência de uma plataforma ou refinaria, mas pelo ciclo de vida completo e pelos efeitos cumulativos da infraestrutura (IFC, 2015, 2016).

No Brasil, a discussão apresenta uma particularidade. A matriz energética possui participação renovável superior à média mundial, mas petróleo e derivados ainda constituem a maior fonte individual de oferta de energia. Em 2025, responderam por 33,7% da Oferta Interna de Energia, equivalente a 110,6 milhões de toneladas equivalentes de petróleo. A expansão do pré-sal também elevou a produção nacional, as exportações, as receitas públicas e a capacidade tecnológica. Ao mesmo tempo, ampliou a responsabilidade sobre segurança operacional, proteção do ambiente marinho e coerência entre política petrolífera e compromissos climáticos (ANP, 2026a; EPE, 2026).

Este capítulo analisa a cadeia do petróleo sob a perspectiva da Engenharia Química e do desenvolvimento sustentável. A abordagem consiste em revisão narrativa de literatura científica, documentos técnicos e estatísticas oficiais. São discutidos fundamentos de formação e composição, operações de produção, transporte, refino e petroquímica, inserção na matriz energética, desempenho ambiental, benefícios, limitações, inovações e tendências. O pré-sal brasileiro é utilizado como estudo de caso para demonstrar que uma mesma atividade pode produzir benefícios econômicos e tecnológicos, mas também gerar riscos ambientais, emissões e dependência de longo prazo.

A análise adota uma distinção central. Tecnologias de mitigação e melhorias de eficiência reduzem impactos por unidade produzida, mas não substituem mudanças estruturais capazes de diminuir a demanda por combustíveis fósseis e ampliar matérias-primas e sistemas energéticos de baixo carbono. Essa distinção permite compreender tanto a contribuição imediata da Engenharia Química para uma operação mais segura e eficiente quanto seu papel na transformação da base material e energética da indústria (IEA, 2023; IPCC, 2023).

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Formação geológica e ocorrência

O petróleo é uma mistura natural formada principalmente por compostos de carbono e hidrogênio. Sua origem está associada ao acúmulo de matéria orgânica, como algas, plâncton e outros organismos, em ambientes sedimentares com condições favoráveis de preservação. Ao longo de milhões de anos, soterramento, pressão e temperatura transformam essa matéria inicialmente em querogênio e, dentro de determinadas janelas térmicas, em petróleo e gás natural (Speight, 2014).

Para que ocorra uma acumulação comercial, não basta a presença de uma rocha geradora. O sistema petrolífero deve apresentar caminhos de migração, rocha reservatório com porosidade e permeabilidade adequadas, rocha selante de baixa permeabilidade e uma armadilha capaz de reter os fluidos. As armadilhas podem ser estruturais, estratigráficas ou combinadas. A localização de reservatórios exige integração de geologia, geoquímica, geofísica e engenharia, pois a identificação de uma estrutura não garante a existência de volumes tecnicamente recuperáveis e economicamente viáveis (Thomas, 2001).

O caráter não renovável do petróleo decorre da diferença entre a escala temporal de formação geológica e a velocidade de extração. Enquanto os depósitos resultam de processos que duram milhões de anos, um campo pode ser desenvolvido e parcialmente esgotado em poucas décadas. Assim, mesmo quando novas reservas são descobertas, o petróleo não se enquadra no conceito de recurso renovável em escala humana (Speight, 2014).

2.2 Composição, propriedades e classificação

A composição do petróleo varia conforme a origem geológica e o histórico térmico do reservatório. Os principais grupos de hidrocarbonetos são parafinas ou alcanos, naftenos ou cicloalcanos e aromáticos. A mistura também contém resinas, asfaltenos, compostos de enxofre, nitrogênio e oxigênio, além de traços de metais como níquel e vanádio. Essas diferenças alteram o valor comercial, a facilidade de produção e a complexidade do refino (Speight, 2014).

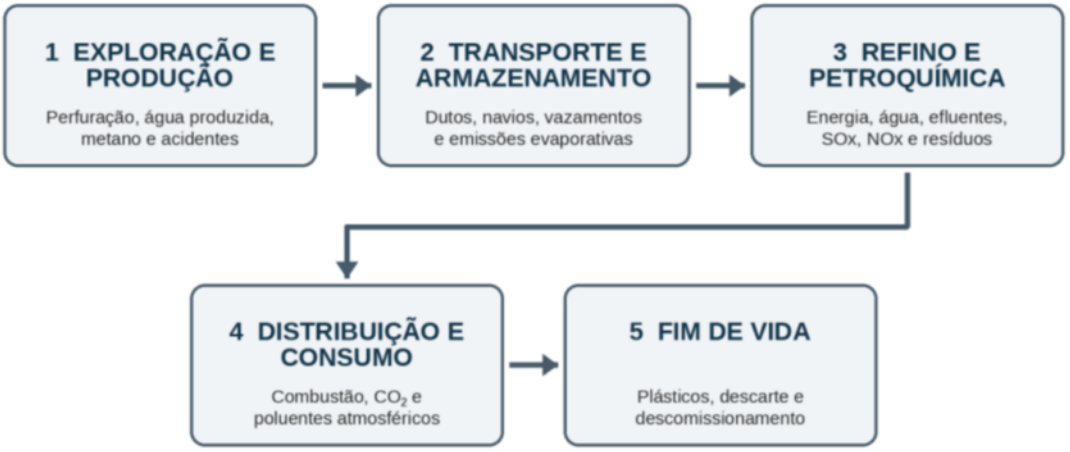
Uma propriedade amplamente utilizada é a densidade expressa em graus API. Petróleos de maior grau API são mais leves e, em geral, apresentam maior rendimento de frações de maior valor, como gasolina, querosene e diesel. Petróleos pesados possuem maior proporção de moléculas de alto peso molecular, asfaltenos e resíduos, exigindo unidades de conversão mais intensivas. O teor de enxofre também é relevante: óleos doces apresentam baixo teor, enquanto óleos com maior teor de enxofre (sour) demandam maior hidrotratamento para atender limites de qualidade dos combustíveis e de emissões atmosféricas (Gary; Handwerk; Kaiser, 2007; Speight, 2014).

A energia liberada na combustão decorre da oxidação do carbono e do hidrogênio. Para um hidrocarboneto genérico, a reação estequiométrica ideal pode ser representada por (Speight, 2014):

$$C_xH_y + (x + y/4)\ O_2 \rightarrow x\ CO_2 + (y/2)\ H_2O + \text{energia}$$

A equação evidencia que a formação de dióxido de carbono não é um efeito acidental, mas uma consequência química inerente ao uso energético de hidrocarbonetos. A combustão real pode ainda produzir monóxido de carbono, hidrocarbonetos não queimados e material particulado, especialmente quando há mistura inadequada, baixa temperatura ou deficiência de oxigênio. O enxofre presente no combustível pode formar óxidos de enxofre, e as altas temperaturas favorecem a formação de óxidos de nitrogênio (IFC, 2016; Speight, 2014).

Figura 1 - Cadeia do petróleo e principais interfaces ambientais.



Fonte: elaboração própria, com base em Speight (2014) e IPCC (2022).

3 TECNOLOGIAS E PROCESSOS DA CADEIA PETROLÍFERA

3.1 Exploração e produção no segmento upstream

O segmento upstream compreende exploração, avaliação, desenvolvimento e produção. A exploração normalmente começa com estudos regionais e levantamentos geofísicos. A sísmica de reflexão utiliza fontes de energia e sensores para estimar a geometria das camadas em subsuperfície. Os dados passam por processamento computacional e interpretação, gerando modelos que orientam a perfuração de poços exploratórios. Em ambiente marítimo, a operação envolve navios sísmicos, sondas, sistemas de posicionamento, colunas ascendentes, preventores de erupção e ampla logística de apoio(IFC, 2015; Thomas, 2001).

Confirmada a descoberta, poços de delimitação reduzem incertezas sobre volume, pressão, permeabilidade e continuidade do reservatório. O plano de desenvolvimento define quantidade e posição de poços produtores e injetores, sistema de coleta, unidade de processamento e rota de escoamento. Durante a construção e a completação do poço, são instalados revestimentos, executadas operações de cimentação e incorporados tubos de produção, válvulas e equipamentos de controle de fluxo. A integridade do poço é essencial para impedir a migração indesejada de fluidos entre formações e proteger aquíferos e o ambiente marinho (IFC, 2015; Thomas, 2001).

A energia natural do reservatório permite a recuperação primária, mas a pressão diminui com a produção. Métodos de recuperação secundária, como injeção de água ou gás, mantêm pressão e deslocam o óleo em direção aos poços. Técnicas de recuperação avançada podem utilizar gás miscível, dióxido de carbono, vapor, polímeros ou surfactantes, conforme as propriedades do fluido e da rocha. A adoção depende do ganho incremental, do consumo de energia, da disponibilidade de insumos, dos riscos e da viabilidade econômica (Thomas, 2001).

Nas operações offshore brasileiras são comuns unidades flutuantes de produção, armazenamento e transferência, conhecidas como FPSO. O fluido produzido é separado em óleo, gás e água. O óleo é tratado e armazenado para transferência a navios aliviadores; o gás pode ser utilizado como combustível, exportado ou reinjetado; e a água produzida requer tratamento antes de reinjeção ou descarte conforme padrões ambientais. A reinjeção de água e gás reduz a necessidade de descarte e auxilia a manutenção da pressão, mas exige compressão, bombeamento e controle de corrosão (Petrobras, 2025; Thomas, 2001).

3.2 Transporte, armazenamento e distribuição no segmento midstream

O segmento midstream conecta campos produtores, terminais, refinarias e mercados consumidores. Oleodutos apresentam elevada eficiência para fluxos contínuos, porém dependem de estações de bombeamento, monitoramento de pressão, proteção catódica, inspeção interna e planos de resposta. Navios petroleiros oferecem flexibilidade geográfica, mas introduzem riscos de colisão, encalhe e falhas durante transferências. Terminais e tanques necessitam de sistemas de contenção, detecção de vazamentos, controle de vapores e prevenção de incêndios (IFC, 2007, 2015).

A gestão de integridade deve ser baseada em risco. Corrosão interna e externa, fadiga, defeitos de solda, movimentação do solo, interferência de terceiros e falhas operacionais podem provocar perda de contenção. Sistemas de supervisão, sensores, inspeção por dispositivos instrumentados, manutenção preditiva e treinamento reduzem a probabilidade de acidentes, embora não eliminem eventos de baixa frequência e alta consequência (IFC, 2007; Wanasinghe et al., 2020).

Inventários e operações logísticas também influenciam o desempenho ambiental. Perdas evaporativas, purgas, drenagens e resíduos de limpeza podem ser reduzidos por recuperação de vapores, melhoria de vedações, medição confiável e procedimentos operacionais (Wanasinghe et al., 2020). A

digitalização de dutos e terminais permite detectar pequenas variações de pressão, vazão e composição associadas a falhas incipientes.

3.3 Refino e petroquímica no segmento downstream

O refino representa uma das etapas de maior interface com a Engenharia Química, pois transforma uma alimentação extremamente complexa em diversas correntes com propriedades e especificações definidas (Gary; Handwerk; Kaiser, 2007).

Antes da destilação, o petróleo é submetido ao dessalgamento, operação destinada principalmente à remoção de água, sais inorgânicos e sólidos. A presença desses componentes pode provocar corrosão, incrustações e redução do desempenho das unidades subsequentes (Gary; Handwerk; Kaiser, 2007).

Na destilação atmosférica, o petróleo previamente aquecido é separado de acordo com a volatilidade de seus constituintes, produzindo correntes que incluem gases, nafta, querosene, frações de diesel e resíduo atmosférico. Não se trata de separação em componentes químicos puros, mas de obtenção de cortes com determinadas faixas de ebulição (Gary; Handwerk; Kaiser, 2007).

O resíduo atmosférico pode ser alimentado à destilação a vácuo, na qual a redução da pressão permite vaporizar componentes de menor volatilidade em temperaturas inferiores às que provocariam craqueamento térmico significativo. Dessa operação são obtidos gasóleos de vácuo e resíduo de vácuo (Gary; Handwerk; Kaiser, 2007).

Como a distribuição natural das frações presentes no petróleo não corresponde necessariamente à demanda de mercado, as refinarias utilizam unidades de conversão para modificar a estrutura molecular dos hidrocarbonetos. O craqueamento catalítico fluido, ou FCC, converte gasóleos pesados em correntes mais leves, incluindo gasolina, GLP e olefinas. O processo emprega catalisadores sólidos finamente divididos que circulam continuamente entre o reator e o regenerador (Gary; Handwerk; Kaiser, 2007).

No hidrocraqueamento, moléculas pesadas são convertidas na presença de hidrogênio e catalisadores, permitindo elevada qualidade dos destilados produzidos. O processo opera sob pressões de hidrogênio relativamente elevadas e combina reações de hidrogenação e quebra de ligações carbono-carbono. O coqueamento é empregado para converter resíduos pesados de baixo valor em gases, produtos líquidos e coque de petróleo. Processos como reforma catalítica, isomerização e alquilação modificam

a estrutura dos hidrocarbonetos para obtenção de correntes com propriedades adequadas à formulação de combustíveis (Gary; Handwerk; Kaiser, 2007).

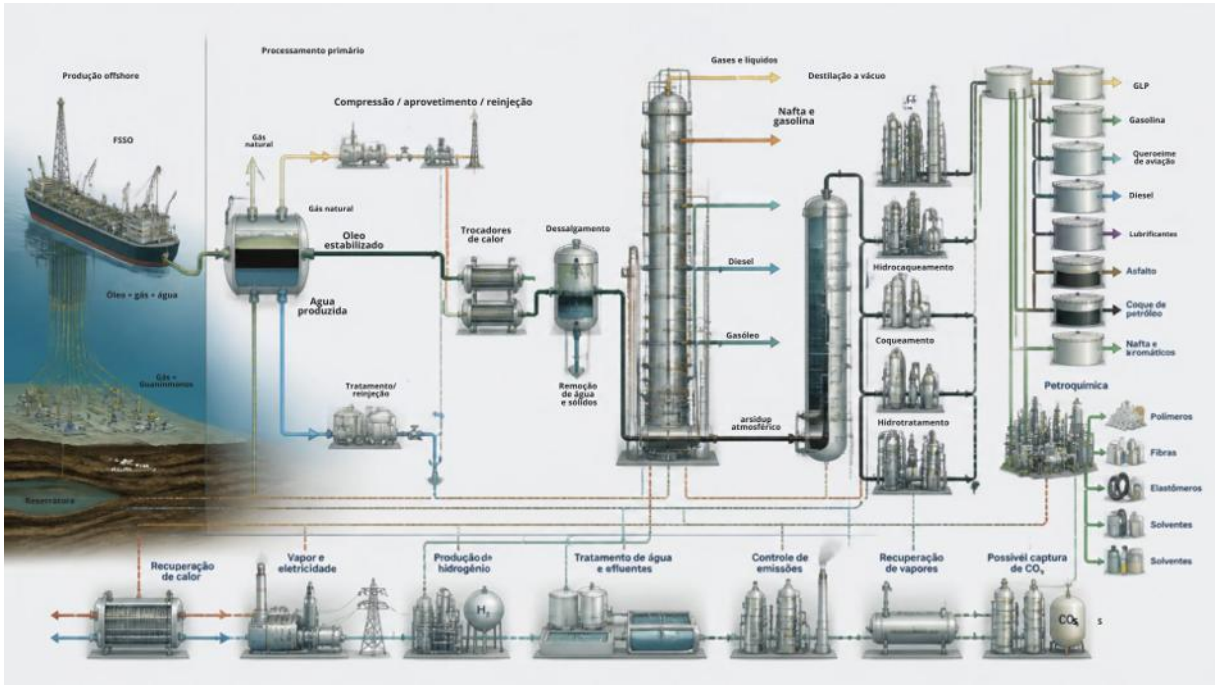
O hidrotratamento desempenha papel central na remoção de enxofre, nitrogênio e metais e na hidrogenação de compostos insaturados. O aumento das exigências de qualidade dos combustíveis tornou essas unidades progressivamente importantes nas refinarias modernas (Gary; Handwerk; Kaiser, 2007).

Além da conversão de matéria, uma refinaria constitui um sistema intensamente integrado em energia. Fornos, caldeiras, sistemas de geração de vapor, redes de trocadores de calor, compressores e unidades de produção de hidrogênio representam parcela significativa do consumo energético. A integração térmica permite recuperar energia de correntes quentes e transferi-la para correntes que necessitam de aquecimento. Estratégias de análise Pinch, otimização de redes de trocadores e recuperação de calor residual podem reduzir demanda por combustível e emissões associadas (Smith, 2016).

A complexidade da refinaria amplia sua capacidade de converter petróleos pesados e produzir derivados dentro de especificações rigorosas. Essa maior flexibilidade, contudo, geralmente está associada a maiores investimentos, maior consumo de hidrogênio e energia e aumento da complexidade operacional (Gary; Handwerk; Kaiser, 2007).

Além dos combustíveis, correntes como nafta, GLP e aromáticos alimentam a indústria petroquímica. A partir delas são produzidos polímeros, fibras, elastômeros, solventes, tintas, detergentes e inúmeros intermediários químicos. Nesse sentido, o petróleo deve ser compreendido simultaneamente como recurso energético e matéria-prima da indústria de transformação (Gary; Handwerk; Kaiser, 2007; Speight, 2014).

Figura 2 - Visão global do processamento do petróleo.



Fonte: elaboração própria (2026), com base em Gary, Handwerk e Kaiser (2007) e Speight (2014).

Tabela 1 - Principais etapas da cadeia petrolífera, funções e aspectos ambientais.

Etapa	Função principal	Aspectos e riscos ambientais
Exploração	dentificação de estruturas e avaliação de recursos	Perturbação acústica, ocupação, resíduos e incerteza exploratória
Perfuração e produção	Acesso ao reservatório e produção de óleo e gás	Emissões fugitivas, flaring, água produzida, cascalhos e risco de perda de controle
Transporte e armazenamento	Movimentação entre campos, terminais e refinarias	Vazamentos, emissões evaporativas, acidentes e riscos de incêndio
Refino	Separação, conversão e tratamento das correntes	Consumo de energia e água, emissões, efluentes, lodos e catalisadores exauridos
Distribuição e uso	Disponibilização e consumo de combustíveis e produtos	Emissões de CO2 e poluentes locais, resíduos e dependência da infraestrutura
Descomissionamento	Encerramento seguro de poços e instalações	Passivos ambientais, resíduos e necessidade de monitoramento de longo prazo

Fonte: elaboração própria (2026), com base em Speight (2014), IFC (2007, 2015, 2016) e IPCC (2022).

4 PETRÓLEO NA MATRIZ ENERGÉTICA E NAS CADEIAS INDUSTRIAIS

O petróleo desempenha simultaneamente funções energéticas e não energéticas. Nos transportes, seus derivados continuam predominantes em veículos pesados, aviação e navegação, segmentos nos quais densidade energética, autonomia e rapidez de abastecimento permanecem características tecnicamente importantes (IEA, 2025b; IPCC, 2022).

Na indústria, combustíveis derivados do petróleo são utilizados para geração de calor e acionamento de equipamentos. O GLP possui relevante utilização doméstica e comercial, enquanto lubrificantes, asfaltos e matérias-primas petroquímicas atendem aplicações que não podem ser substituídas diretamente pela eletrificação (Speight, 2014).

No cenário mundial, a trajetória futura da demanda tende a ser heterogênea. A Agência Internacional de Energia estima que, sob as políticas consideradas em Oil 2025, mudanças estruturais no transporte rodoviário e na geração de energia diminuem a expansão da demanda por combustíveis, enquanto a petroquímica tende a assumir participação crescente no consumo de petróleo até o final da década (IEA, 2025b).

Esse movimento evidencia uma questão frequentemente negligenciada nas discussões sobre transição energética: a eletrificação dos transportes reduz a demanda energética por derivados, mas não elimina automaticamente a utilização do petróleo como matéria-prima química. A expansão de automóveis elétricos, melhorias de eficiência veicular, ampliação de transportes coletivos e ferroviários e maior uso de biocombustíveis podem reduzir a demanda por gasolina e diesel. Entretanto, urbanização, aumento da mobilidade e consumo de materiais em economias emergentes criam trajetórias regionais distintas (IEA, 2025b).

No Brasil, a Oferta Interna de Energia atingiu 328,5 Mtep em 2025, crescimento de 1,9% em relação ao ano anterior. As fontes renováveis representaram 49,4% da matriz, enquanto petróleo e derivados corresponderam a 33,7% da oferta total, permanecendo como sua principal fonte individual. A quantidade ofertada de petróleo e derivados aumentou de 109,6 Mtep em 2024 para 110,6 Mtep em 2025 (EPE, 2026).

A importância do transporte na demanda por combustíveis permanece evidente. Em 2025, o consumo de energia nesse setor aumentou 3,5%. A renovabilidade dos transportes alcançou 26,1%, favorecida principalmente pela utilização de etanol e biodiesel. O consumo de etanol no transporte aumentou

4,3%, enquanto o biodiesel apresentou expansão de 8,2%. A gasolina C aumentou 6,8% em relação a 2024. O percentual obrigatório de biodiesel incorporado ao diesel mineral passou para 15% em agosto de 2025 (EPE, 2026).

Esses dados demonstram uma característica particular da transição energética brasileira: a substituição dos derivados fósseis ocorre parcialmente dentro da própria infraestrutura de combustíveis líquidos, por meio da incorporação de biocombustíveis, simultaneamente ao processo de eletrificação (EPE, 2026).

Tabela 2 - Indicadores selecionados da cadeia do petróleo e do sistema energético brasileiro em 2025.

Indicador	**Valor em 2025**
Oferta Interna de Energia	328,5 Mtep
Participação de fontes renováveis na OIE	49,4%
Participação de petróleo e derivados na OIE	33,7%
Oferta de petróleo e derivados	110,6 Mtep
Produção média nacional de petróleo	aprox. 3,8 milhões bbl/dia
Participação aproximada do pré-sal na produção	cerca de 80%
Participação offshore na produção de petróleo	97,6%
Reservas provadas de petróleo	17,5 bilhões de barris
Emissões associadas à matriz energética	442,3 Mt CO2e
Emissões do setor de transportes	220,8 Mt CO2e

Fonte: elaboração própria com dados da EPE (2026) e ANP (2026a). Nota: Mtep = milhões de toneladas equivalentes de petróleo; Mt CO2e = milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente.

5 DESEMPENHO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE DA CADEIA PETROLÍFERA

5.1 Emissões, mudanças climáticas e poluição atmosférica

As emissões de gases de efeito estufa ocorrem em praticamente todas as etapas da cadeia petrolífera. Exploração, produção, separação, compressão, transporte e refino consomem energia, enquanto equipamentos e sistemas de processo podem liberar hidrocarbonetos para a atmosfera (IEA, 2023).

A combustão dos produtos representa, entretanto, parcela dominante do impacto climático de grande parte dos combustíveis derivados do petróleo. Essa característica diferencia emissões operacionais,

potencialmente reduzíveis por modificações no processo, daquelas inerentes à oxidação do carbono presente no produto comercializado (IEA, 2023; IPCC, 2022).

A intensidade de carbono da produção varia significativamente entre campos. Fatores como profundidade, razão gás-óleo, propriedades do fluido, necessidade de injeção, sistemas de recuperação, consumo energético e gestão do gás associado modificam o desempenho de cada operação. Masnadi et al. (2018) demonstraram ampla variabilidade da intensidade de carbono entre diferentes sistemas de produção de petróleo.

O metano merece atenção particular por apresentar elevado potencial de aquecimento em horizontes temporais mais curtos e por sua emissão poder ocorrer em fontes pontuais e intermitentes. Vazamentos em válvulas, conexões, tanques, sistemas de alívio e compressores podem não ser adequadamente representados por inventários baseados exclusivamente em fatores médios (IEA, 2025a; Rutherford et al., 2021).

Rutherford et al. (2021), ao analisarem dados de produção nos Estados Unidos, observaram discrepâncias importantes entre determinados inventários e estimativas apoiadas por medições. Os valores não devem ser transpostos diretamente para o contexto brasileiro, mas reforçam a importância de programas de detecção e reparo de vazamentos e do emprego de monitoramento instrumental.

A queima em flare é utilizada principalmente em situações nas quais o gás não pode ser imediatamente aproveitado ou processado. Embora a conversão do metano a CO2 reduza o impacto climático por unidade de massa de carbono quando comparada à ventilação direta de metano, o flaring representa perda de recurso energético e continua associado à emissão de gases de efeito estufa. Medidas de controle incluem minimização da ventilação, recuperação de vapores, compressão, aproveitamento do gás, reinjeção, manutenção preventiva e melhoria da eficiência de combustão dos sistemas de flare (IEA, 2025a; IFC, 2015).

Refinarias, unidades de processamento e motores também podem emitir óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, monóxido de carbono, material particulado, benzeno e outros compostos orgânicos voláteis. Tecnologias de tratamento dos combustíveis e das correntes gasosas, associadas a melhorias dos sistemas de combustão, reduziram determinadas emissões específicas, embora o volume de atividade continue sendo um fator importante (IFC, 2016; Speight, 2014).

No contexto brasileiro, as emissões associadas à matriz energética atingiram 442,3 Mt CO2e em 2025, aumento de aproximadamente 3% em relação ao ano anterior. O transporte respondeu por 220,8 Mt CO2e, aproximadamente metade do total relacionado à energia (EPE, 2026).

5.2 Água, solo, resíduos e biodiversidade

A água produzida representa um dos maiores fluxos residuais volumétricos associados à produção de petróleo. Sua composição pode incluir elevada concentração de sais, óleo disperso, compostos orgânicos dissolvidos, metais, aditivos de produção e materiais de ocorrência natural (Fakhru'l-Razi et al., 2009).

Seu tratamento pode combinar separação gravitacional, hidrociclones, flotação, filtração e outras operações físico-químicas. Em determinadas condições, a água é reinjetada no reservatório, reduzindo a necessidade de descarte e contribuindo para manutenção da pressão. Essa solução, entretanto, exige consumo de energia, sistemas de bombeamento e garantia de integridade das instalações (Fakhru'l-Razi et al., 2009; IFC, 2015).

Fluidos e cascalhos de perfuração necessitam de gerenciamento apropriado. A seleção entre fluidos de base aquosa e não aquosa deve considerar as exigências de perfuração, a composição, a toxicidade, a biodegradabilidade e as condições de destinação. Formulações de base não aquosa podem ser necessárias em determinadas condições e exigem medidas compatíveis de contenção, tratamento e destinação (IFC, 2015).

No refino, os principais resíduos incluem lodos oleosos, borras, catalisadores exauridos, resíduos de coque e materiais contaminados. Estratégias modernas de gestão procuram priorizar redução na fonte, recuperação de hidrocarbonetos, regeneração e reciclagem antes da disposição final (IFC, 2016).

Derramamentos de petróleo apresentam consequências que dependem da composição do produto, quantidade liberada, características do ambiente, grau de intemperismo e eficiência da resposta. Hidrocarbonetos aromáticos apresentam particular relevância toxicológica. Manguezais, estuários, recifes, costões e ambientes profundos possuem vulnerabilidades distintas. A revisão de Beyer et al. (2016) sobre o acidente da Deepwater Horizon identificou impactos em diferentes níveis ecológicos, enquanto Buskey, White e Esbaugh (2016) discutiram efeitos sobre plâncton, organismos nectônicos e comunidades bentônicas.

Essas experiências demonstram que a prevenção e a preparação para emergências possuem importância fundamental, pois a remediação posterior não necessariamente restaura integralmente os sistemas afetados (Beyer et al., 2016; IFC, 2015).

Em ambientes terrestres, vazamentos de oleodutos, tanques e sistemas de armazenamento podem contaminar solos e águas subterrâneas. Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, frequentemente agrupados como BTEX, apresentam relevância devido à mobilidade e à toxicidade. A seleção da estratégia de remediação deve considerar fonte, vias de migração, propriedades do contaminante e receptores. Remoção de fase livre, extração de vapores, bombeamento e tratamento, oxidação química e biorremediação são exemplos de tecnologias aplicáveis conforme o modelo conceitual da área (United States, 2017).

5.3 A cadeia petrolífera e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

A relação entre a indústria do petróleo e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável é complexa e envolve simultaneamente contribuições socioeconômicas e impactos ambientais (United Nations, 2015; UNDP; IFC; IPIECA, 2017).

No ODS 7, a indústria contribui historicamente para segurança e disponibilidade energética, embora sua natureza fóssil crie limitações em relação ao aumento da participação de fontes renováveis. No ODS 9, o desenvolvimento de engenharia offshore, automação, materiais, processos de separação e sistemas submarinos impulsiona inovação e capacidade industrial (UNDP; IFC; IPIECA, 2017).

O ODS 12 conecta-se à eficiência de matérias-primas, prevenção de perdas, gestão de resíduos e circularidade de produtos petroquímicos. A redução da geração de resíduos, recuperação de correntes e desenvolvimento de rotas de reciclagem são áreas nas quais a Engenharia Química pode contribuir diretamente (UNDP; IFC; IPIECA, 2017).

No ODS 13, o principal desafio é a redução consistente das emissões de gases de efeito estufa. Melhorias na eficiência operacional diminuem a intensidade de carbono da produção, mas precisam ser interpretadas em conjunto com a quantidade total de produtos fósseis consumidos (IPCC, 2023).

Há também interfaces importantes com o ODS 3, devido aos efeitos da poluição atmosférica e aos riscos ocupacionais; ODS 6, em função da gestão de água produzida e efluentes; ODS 8, pela geração

de empregos e atividade econômica; e ODS 14, especialmente em operações offshore (UNDP; IFC; IPIECA, 2017).

A avaliação de sustentabilidade deve, portanto, distinguir melhorias relativas de processo de reduções absolutas de impactos. Uma instalação pode se tornar mais eficiente e menos intensiva em emissões por unidade produzida sem necessariamente reduzir as emissões totais caso a produção aumente de forma significativa (IPCC, 2022).

6 BENEFÍCIOS, LIMITAÇÕES E COMPROMISSOS TECNOLÓGICOS

Entre as principais vantagens técnicas associadas ao petróleo destacam-se elevada densidade energética, estabilidade de armazenamento, infraestrutura global consolidada e capacidade de conversão em numerosos produtos. Essas características continuam particularmente relevantes em aplicações nas quais a relação entre massa, volume e conteúdo energético é determinante, como aviação e navegação. Além disso, diversos materiais e intermediários petroquímicos ainda não dispõem de alternativas renováveis equivalentes em escala, custo e desempenho (IEA, 2023; Speight, 2014).

A cadeia petrolífera também gera empregos especializados, investimentos industriais, arrecadação fiscal e receitas de exportação. Países produtores podem utilizar essa estrutura tecnológica para desenvolver competências em engenharia, geociências, automação, materiais e processamento (ANP, 2026b; IEA, 2023).

Tabela 3 - Benefícios, limitações e condições de gestão da cadeia do petróleo.

Dimensão	Benefício ou oportunidade	Condição ou contrapartida
Segurança energética	Produção doméstica reduz exposição a interrupções externas	Diversificação e planejamento da redução gradual da dependência
Desenvolvimento econômico	Receitas, exportações, empregos e cadeias industriais	Governança fiscal e investimento em ativos produtivos de longo prazo
Desempenho técnico	Alta densidade energética e infraestrutura madura	Eficiência e substituição onde existam alternativas tecnicamente viáveis
Engenharia de processos	Ampla base tecnológica em separação, reação e processamento	Redução contínua de consumo energético, perdas e emissões
Clima	Possibilidade de reduzir intensidade operacional	Necessidade de redução de emissões absolutas e da demanda fóssil

Ambiente local	Tecnologias avançadas de prevenção e resposta	Licenciamento, monitoramento e gestão de risco
Transição tecnológica	Competências do setor podem migrar para novas cadeias	Evitar dependência excessiva de ativos intensivos em carbono

Fonte: elaboração própria (2026), com base em IEA (2023) e IPCC (2022).

As limitações, entretanto, são estruturais. O petróleo constitui um recurso finito, seus preços apresentam volatilidade e sua distribuição geográfica influencia relações econômicas e geopolíticas (Speight, 2014). Outro aspecto relevante é a longa vida útil da infraestrutura. Refinarias, plataformas, oleodutos e terminais são projetados para operar durante décadas. Esses investimentos podem criar dependência tecnológica e econômica, uma vez que sua rentabilidade pressupõe longos períodos de utilização (IEA, 2023).

Caso mudanças regulatórias, tecnológicas ou de mercado reduzam a demanda mais rapidamente que o esperado, determinados ativos podem perder valor antes do final da vida inicialmente projetada. Por outro lado, a manutenção de elevada utilização de infraestrutura fóssil pode dificultar reduções absolutas de emissões. O principal compromisso tecnológico do setor está, portanto, entre atender à demanda presente e reduzir progressivamente sua intensidade ambiental e dependência futura (IEA, 2023).

A captura e o armazenamento de carbono podem reduzir emissões provenientes de correntes concentradas, como determinadas unidades de hidrogênio e processamento de gás. Contudo, a tecnologia exige separação, compressão, transporte, injeção, monitoramento e energia adicional. Biocombustíveis e eletrificação atuam principalmente pelo lado da demanda, reduzindo a necessidade de derivados fósseis. Sua adoção, entretanto, envolve outros desafios de infraestrutura, disponibilidade de matérias-primas, uso da terra e planejamento energético (IEA, 2023; IPCC, 2022).

7 PRÉ-SAL BRASILEIRO: ENGENHARIA, PRODUTIVIDADE E DESAFIOS DE SUSTENTABILIDADE

7.1 Características técnicas e relevância produtiva

O pré-sal brasileiro compreende grandes acumulações de hidrocarbonetos localizadas abaixo de extensas sequências de rochas evaporíticas, principalmente nas bacias de Santos e Campos. Os reservatórios encontram-se em ambiente marítimo de águas profundas e ultraprofundas e envolvem

extensas colunas de água e sedimentos. A combinação de profundidade, pressão, temperatura, propriedades das rochas carbonáticas e composição dos fluidos impôs desafios significativos ao desenvolvimento dos campos (Godoi; Matai, 2021).

Sua exploração demandou avanços em processamento sísmico abaixo do sal, perfuração direcional, completação de poços, sistemas submarinos, materiais, garantia de escoamento, separação multifásica e processamento em FPSOs (Godoi; Matai, 2021).

A produção brasileira apresentou forte crescimento recente. Em 2025, a média nacional alcançou aproximadamente 3,8 milhões de barris de petróleo por dia, crescimento de cerca de 12% em relação ao ano anterior. A produção do pré-sal atingiu aproximadamente 3 milhões de barris por dia, equivalente a cerca de 80% da produção brasileira. As reservas provadas de petróleo atingiram 17,5 bilhões de barris, crescimento de 3,8% em relação a 2024 (ANP, 2026a).

A produção brasileira permanece fundamentalmente offshore: 97,6% do petróleo produzido em 2025 teve origem marítima. O estado do Rio de Janeiro respondeu por aproximadamente 87,8% do volume nacional (EPE, 2026; ANP, 2026a).

A dimensão econômica é igualmente expressiva. Em 2025, foram apurados aproximadamente R$ 62,16 bilhões em royalties, frente a R$ 58,22 bilhões no ano anterior. A participação especial totalizou cerca de R$ 36,74 bilhões segundo o Relatório de Gestão da ANP (ANP, 2026b). Além das participações governamentais, os contratos de exploração e produção geraram aproximadamente R$ 4,3 bilhões em obrigações de investimento em pesquisa, desenvolvimento e inovação (ANP, 2026a).

A utilização socialmente produtiva dessas receitas constitui uma dimensão importante do legado da atividade petrolífera. No Brasil, as participações governamentais, o Fundo Social e a destinação de determinadas receitas à educação e à saúde possuem marcos legais específicos (Brasil, 1997, 2010, 2013). Recursos provenientes de uma riqueza não renovável podem ser convertidos em educação, ciência, saneamento, infraestrutura e diversificação econômica, reduzindo a dependência de longo prazo da própria commodity que os originou (IEA, 2023).

7.2 Desafios ambientais e soluções tecnológicas

As operações em águas profundas concentram desafios técnicos particulares. Um vazamento submarino pode ocorrer a centenas ou milhares de metros abaixo da superfície, sob altas pressões e

em local de difícil acesso. A eficiência da resposta depende da capacidade de detectar rapidamente o evento, interromper a fonte, mobilizar equipamentos e prever a dispersão do produto. Correntes marítimas, profundidade, propriedades do óleo e condições meteorológicas influenciam seu transporte e destino ambiental (Beyer et al., 2016; IFC, 2015).

Outro desafio relevante está associado ao gás produzido juntamente com o petróleo. Em determinadas áreas do pré-sal, a corrente gasosa pode apresentar concentração significativa de dióxido de carbono. Sistemas de separação permitem remover parte desse CO2 e reinjetá-lo no reservatório juntamente com outros componentes do gás. A reinjeção reduz a necessidade de lançamento direto para a atmosfera e pode contribuir para a manutenção da pressão do reservatório (Godoi; Matai, 2021; Petrobras, 2025).

Do ponto de vista da engenharia de processos, entretanto, a reinjeção não ocorre sem custo energético. Separação e compressão de gases a pressões elevadas demandam potência significativa, de modo que o desempenho ambiental deve ser avaliado considerando a energia consumida pelo processo completo. A redução da intensidade operacional passa também pela otimização de sistemas de compressão, bombeamento, geração de energia e tratamento de fluidos. (IEA, 2023; Smith, 2016)

Tecnologias digitais têm adquirido crescente importância. Modelos de reservatório integrados a dados de produção permitem otimizar estratégias de injeção e reduzir intervenções. Sistemas de manutenção preditiva podem identificar alterações de vibração, pressão ou temperatura antes da ocorrência de falhas (Wanasinghe et al., 2020). Veículos operados remotamente e robôs submarinos possibilitam inspeção de equipamentos em condições nas quais intervenções humanas seriam tecnicamente difíceis e perigosas (Christ; Wernli Sr., 2014).

Esses avanços podem reduzir riscos e emissões por unidade produzida. No entanto, a análise ambiental do produto não se encerra na fronteira da plataforma. A maior parte do carbono contido no petróleo produzido será posteriormente convertida em CO2 se os derivados forem utilizados como combustíveis (IEA, 2023; IPCC, 2022).

7.3 O pré-sal sob a perspectiva da transição energética

O pré-sal representa simultaneamente uma conquista tecnológica e um desafio estratégico para a transição energética brasileira. De um lado, seus reservatórios apresentam elevada produtividade,

permitindo produção em grande escala e contribuindo para receitas públicas, exportações, desenvolvimento industrial e formação de competências tecnológicas (Godoi; Matai, 2021). De outro, a expansão da produção ocorre em um cenário internacional no qual reduções substanciais do consumo de combustíveis fósseis são necessárias para limitar o aquecimento global (IPCC, 2023).

Welsby et al. (2021) analisaram a quantidade de reservas fósseis que precisaria permanecer sem extração em cenários compatíveis com a limitação do aquecimento global. Esses resultados evidenciam a diferença entre melhorar a eficiência da produção de um recurso fóssil e reduzir a quantidade absoluta de carbono destinada à combustão.

Esse ponto é central na avaliação do pré-sal. Produzir um barril com menor emissão operacional representa uma melhoria de desempenho de processo, mas não equivale à eliminação das emissões associadas ao uso desse barril. Consequentemente, a discussão sobre sustentabilidade do pré-sal deve ultrapassar as fronteiras físicas das plataformas (IEA, 2023).

A aplicação das receitas em educação, ciência, saneamento, adaptação climática, infraestrutura energética e diversificação econômica pode transformar uma renda temporária proveniente de um recurso não renovável em ativos sociais e tecnológicos de longa duração (IEA, 2023). Simultaneamente, empresas e órgãos reguladores devem manter metas para redução de flaring, emissões de metano, consumo energético e riscos de integridade, além de planejar desde o início o descomissionamento das instalações (IFC, 2015).

A expansão de novos projetos precisa considerar não apenas a existência geológica da reserva, mas também cenários de demanda, competitividade econômica, intensidade de carbono e risco de perda de valor de ativos em uma economia progressivamente descarbonizada (IEA, 2023; Welsby et al., 2021).

8 INOVAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO TECNOLÓGICA DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

A inovação na cadeia petrolífera tende a ocorrer em duas frentes simultâneas: melhoria do desempenho das operações ainda necessárias e transferência das competências desenvolvidas pelo setor para novas cadeias industriais de baixo carbono (IEA, 2023).

Sensores avançados, internet industrial, inteligência artificial e manutenção preditiva permitem integrar grandes volumes de informações de processos. Pressão, temperatura, vazão, vibração e

composição podem ser monitoradas continuamente e utilizadas para antecipar falhas e ajustar condições operacionais. Na produção, modelos digitais dos reservatórios podem auxiliar a otimização de injeção e produção. Nas refinarias, algoritmos avançados de controle permitem reduzir variabilidade, otimizar consumo energético e aumentar rendimento de produtos de maior valor (Wanasinghe et al., 2020).

A eletrificação de compressores, bombas e outras cargas pode reduzir emissões locais quando a eletricidade empregada apresenta baixa intensidade de carbono. Em ambientes offshore, propostas incluem conexão das plataformas ao sistema elétrico, integração com geração eólica marítima e compartilhamento energético entre instalações (IEA, 2023).

Recuperação de calor, melhoria dos sistemas de vapor, otimização de fornos e redes de trocadores representam oportunidades importantes em refinarias. A redução do consumo específico de energia diminui simultaneamente os custos operacionais e as emissões associadas à geração de calor (Smith, 2016).

A produção de hidrogênio representa outro ponto estratégico. O hidrogênio é indispensável em processos como hidrotratamento e hidrocraqueamento. Tradicionalmente, grande parte é produzida a partir da reforma do gás natural, processo associado à geração de CO2 (Gary; Handwerk; Kaiser, 2007). A integração com captura de carbono ou utilização progressiva de hidrogênio produzido por eletrólise com eletricidade de baixa emissão pode reduzir a intensidade de carbono dessas operações (IEA, 2023).

A captura e o armazenamento geológico de carbono constituem uma alternativa particularmente relevante para correntes industriais concentradas. Após sua separação, o CO2 precisa ser comprimido, transportado e injetado em formações geológicas adequadas, exigindo monitoramento de pressão, migração e integridade de longo prazo. De acordo com o IPCC (2022), tecnologias de captura e armazenamento podem desempenhar papel importante na mitigação de emissões industriais residuais. Entretanto, custo, penalidade energética, infraestrutura e responsabilidade pelo armazenamento permanecem desafios relevantes.

Outra trajetória envolve a integração das refinarias tradicionais com matérias-primas renováveis. O coprocessamento de biocomponentes e a produção de combustíveis sustentáveis para aviação e diesel renovável permitem aproveitar parcialmente instalações existentes. Essa integração aproxima

conceitualmente refinarias e biorrefinarias, ampliando o conjunto de matérias-primas processadas (Petrobras, 2025). O desempenho ambiental, contudo, depende da origem da biomassa, do uso da terra, da logística, do consumo energético e da avaliação de ciclo de vida (IPCC, 2022).

Na petroquímica, o desafio é particularmente relevante porque o declínio dos combustíveis fósseis não implica necessariamente diminuição proporcional da demanda por materiais. Design para reciclagem, redução de produtos descartáveis, reutilização e reciclagem mecânica e química assumem crescente importância. Processos de pirólise e outras rotas químicas podem converter determinados resíduos poliméricos em moléculas reutilizáveis como matéria-prima, embora seus balanços energético, econômico e ambiental devam ser avaliados caso a caso (IEA, 2023; Ragaert; Delva; Van Geem, 2017).

A economia circular, nesse contexto, modifica parcialmente a lógica tradicional linear de extração, processamento, consumo e descarte, introduzindo fluxos de recuperação de materiais e carbono (UNDP; IFC; IPIECA, 2017; Ragaert; Delva; Van Geem, 2017).

9 O PAPEL DA ENGENHARIA NA TRANSIÇÃO DO SETOR PETROLÍFERO

A análise da cadeia evidencia que o petróleo permanece integrado a diferentes dimensões da sociedade industrial. Sua relevância não decorre apenas dos combustíveis que fornece, mas também da diversidade de matérias-primas e intermediários que alimentam cadeias químicas e de materiais (IEA, 2025b; Speight, 2014).

Ao mesmo tempo, o petróleo não pode ser caracterizado como recurso energético renovável ou intrinsecamente sustentável. A utilização energética de hidrocarbonetos converte o carbono presente nas moléculas em dióxido de carbono, tornando as emissões uma consequência química do processo de combustão (IPCC, 2023; Speight, 2014).

Esse fato estabelece uma distinção importante entre dois tipos de intervenção tecnológica. O primeiro corresponde à melhoria da cadeia existente. Eficiência energética, integração térmica, controle avançado de processos, redução de flaring, recuperação de vapores, prevenção de vazamentos, tratamento de água, reinjeção de CO2 e captura de carbono podem diminuir significativamente os impactos por unidade processada (IEA, 2023; IFC, 2016).

O segundo corresponde à transformação estrutural da matriz de matérias-primas e energia. Ele envolve eletrificação, biocombustíveis, hidrogênio de baixa emissão, matérias-primas renováveis,

circularidade de polímeros, reciclagem química e redução do consumo de combustíveis fósseis (IEA, 2023; IPCC, 2022).

Essas duas trajetórias não devem ser confundidas. Melhorar a eficiência de uma refinaria não elimina a necessidade de alterar progressivamente os sistemas energético e produtivo, assim como a transição energética não elimina imediatamente a necessidade de operar de maneira eficiente e segura a infraestrutura existente (IEA, 2023; IPCC, 2023).

Nesse cenário, a Engenharia Química ocupa posição estratégica. As mesmas competências tradicionalmente aplicadas ao petróleo, como balanços de massa e energia, fenômenos de transporte, termodinâmica, cinética, catálise, operações unitárias, controle de processos e otimização, são necessárias para o desenvolvimento de biorrefinarias, produção de hidrogênio, captura de CO2, combustíveis sintéticos, reciclagem química e novos processos de baixo carbono (IEA, 2023; Smith, 2016).

O desafio da transição não consiste simplesmente em abandonar um conjunto de conhecimentos desenvolvido pela indústria petrolífera. Parte significativa desse conhecimento pode ser redirecionada para transformar as próprias bases materiais e energéticas da indústria (IEA, 2023).

No Brasil, essa transformação possui condições particularmente relevantes. A elevada participação de fontes renováveis na matriz energética, a experiência acumulada com biocombustíveis e a expansão das fontes eólica e solar podem favorecer a eletrificação e a produção de moléculas com menor intensidade de carbono. Em contrapartida, a dimensão econômica e produtiva do pré-sal exige planejamento para evitar dependência excessiva de receitas e infraestrutura fósseis (EPE, 2026; IEA, 2023).

A Engenharia Química deve contribuir para que a redução da dependência do petróleo seja acompanhada por ganhos de eficiência, desenvolvimento tecnológico e substituição racional de matérias-primas, evitando que problemas sejam simplesmente deslocados entre diferentes etapas do ciclo produtivo (IPCC, 2022).

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cadeia do petróleo constitui um exemplo abrangente da aplicação da Engenharia Química em sistemas industriais complexos. Desde o processamento inicial dos fluidos produzidos até as operações

de separação, conversão catalítica, tratamento e integração energética das refinarias, o desempenho do setor depende diretamente de princípios relacionados à transformação de matéria e energia (Gary; Handwerk; Kaiser, 2007).

Em 2025, petróleo e derivados ainda responderam por 33,7% da Oferta Interna de Energia brasileira, correspondendo à maior participação individual entre as fontes. A produção nacional atingiu aproximadamente 3,8 milhões de barris por dia, com cerca de 80% provenientes do pré-sal e 97,6% da produção ocorrendo em ambiente offshore (ANP, 2026a; EPE, 2026).

Essa dimensão produtiva demonstra a relevância econômica e tecnológica da cadeia, mas também amplia sua responsabilidade ambiental. Os impactos estão distribuídos ao longo de todo o ciclo de vida. Emissões de metano e dióxido de carbono, consumo energético, água produzida, resíduos industriais, vazamentos e riscos de acidentes requerem tecnologias de controle e gestão contínua.

A eficiência de processos, integração energética, detecção de vazamentos, reinjeção, eletrificação e captura de carbono oferecem oportunidades concretas de redução dos impactos operacionais. Contudo, nenhuma dessas medidas elimina integralmente as emissões decorrentes da combustão do carbono presente nos derivados utilizados como combustíveis (IEA, 2023; IPCC, 2022).

O caso do pré-sal demonstra que elevada produtividade e desenvolvimento tecnológico não constituem, isoladamente, indicadores suficientes de sustentabilidade. A avaliação deve incorporar desempenho ambiental, governança das receitas, segurança operacional, planejamento de descomissionamento e compatibilidade de longo prazo dos investimentos com cenários de transição energética (IEA, 2023; IFC, 2015).

Nesse processo, a Engenharia Química possui função que ultrapassa a otimização da indústria petrolífera tradicional. As ferramentas utilizadas no projeto e na operação de refinarias podem ser direcionadas à integração com biorrefinarias, produção de hidrogênio, utilização e armazenamento de carbono, valorização de resíduos, reciclagem química e desenvolvimento de novos processos industriais.

Assim, o papel da engenharia não é apenas produzir o mesmo petróleo de maneira progressivamente mais eficiente, mas contribuir para que competências acumuladas em décadas de desenvolvimento industrial sejam utilizadas na construção de sistemas produtivos de menor intensidade de carbono.

O petróleo deverá manter importância em determinadas aplicações durante o processo de transição, particularmente nos setores de substituição mais complexa e como matéria-prima petroquímica. Entretanto, a compatibilidade de sua utilização com uma trajetória de desenvolvimento sustentável dependerá da redução progressiva da demanda energética fóssil, da eficiência no uso dos recursos, da redução absoluta das emissões e da transformação das próprias cadeias industriais que atualmente dependem de hidrocarbonetos (IEA, 2025b; IPCC, 2023).

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2026. Rio de Janeiro: ANP, 2026a.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Relatório de gestão 2025. Rio de Janeiro: ANP, 2026b.

BEYER, J.; TRANNUM, H. C.; BAKKE, T.; HODSON, P. V.; COLLIER, T. K. Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: a review. Marine Pollution Bulletin, [s. l.], v. 110, n. 1, p. 28–51, 2016. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.06.027.

BRASIL. Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 7 ago. 1997.

BRASIL. Lei nº 12.351, de 22 de dezembro de 2010. Dispõe sobre a exploração e a produção de petróleo, de gás natural e de outros hidrocarbonetos fluidos, sob o regime de partilha de produção, em áreas do pré-sal e em áreas estratégicas; cria o Fundo Social – FS [...]. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 23 dez. 2010.

BRASIL. Lei nº 12.858, de 9 de setembro de 2013. Dispõe sobre a destinação para as áreas de educação e saúde de parcela da participação no resultado ou da compensação financeira pela exploração de petróleo e gás natural [...]. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 10 set. 2013.

BUSKEY, E. J.; WHITE, H. K.; ESBAUGH, A. J. Impact of oil spills on marine life in the Gulf of Mexico: effects on plankton, nekton, and deep-sea benthos. Oceanography, [s. l.], v. 29, n. 3, p. 174–181, 2016. DOI: 10.5670/oceanog.2016.81.

CHRIST, R. D.; WERNLI SR., R. L. The ROV manual: a user guide for remotely operated vehicles. 2nd ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2014. DOI: 10.1016/C2011-0-07796-7.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço energético nacional 2026: relatório síntese: ano-base 2025. Rio de Janeiro: EPE, 2026.

GARY, J. H.; HANDWERK, G. E.; KAISER, M. J. Petroleum refining: technology and economics. 5th ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.

GODOI, J. M. A.; MATAI, P. H. L. dos S. Enhanced oil recovery with carbon dioxide geosequestration: first steps at Pre-salt in Brazil. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 1429–1441, 2021. DOI: 10.1007/s13202-021-01102-8.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate change 2022: mitigation of climate change: contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009157926.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate change 2023: synthesis report: contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental

Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647. Disponível em: https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Global Methane Tracker 2025. Paris: IEA, 2025a. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Oil 2025: analysis and forecast to 2030. Paris: IEA, 2025b.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). The oil and gas industry in net zero transitions. Paris: IEA, 2023.

INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION (IFC). Environmental, health, and safety guidelines for onshore oil and gas development. Washington, DC: IFC, 2007.

INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION (IFC). Environmental, health, and safety guidelines for offshore oil and gas development. Washington, DC: IFC, 2015.

INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION (IFC). Environmental, health, and safety guidelines for petroleum refining. Washington, DC: IFC, 2016.

MASNADI, M. S. et al. Global carbon intensity of crude oil production. Science, [s. l.], v. 361, n. 6405, p. 851–853, 2018. DOI: 10.1126/science.aar6859.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. (PETROBRAS). Relatório de sustentabilidade 2024. Rio de Janeiro: Petrobras, 2025.

RAGAERT, K.; DELVA, L.; VAN GEEM, K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. Waste Management, [s. l.], v. 69, p. 24–58, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.07.044.

RUTHERFORD, J. S. et al. Closing the methane gap in US oil and natural gas production emissions inventories. Nature Communications, [s. l.], v. 12, n. 1, art. 4715, 2021. DOI: 10.1038/s41467-021-25017-4.

SMITH, R. Chemical process design and integration. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2016.

SPEIGHT, J. G. The chemistry and technology of petroleum. 5th ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

THOMAS, J. E. (org.). Fundamentos de engenharia de petróleo. Rio de Janeiro: Interciência: Petrobras, 2001.

UNITED NATIONS. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: United Nations, 2015. (A/RES/70/1).

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP); INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION (IFC); IPIECA. Mapping the oil and gas industry to the Sustainable Development Goals: an atlas. New York: UNDP, 2017.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency. How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites: a guide for corrective action plan reviewers. Washington, DC: EPA, 2017. (EPA 510-B-17-003).

WANASINGHE, T. R. et al. Digital twin for the oil and gas industry: overview, research trends, opportunities, and challenges. IEEE Access, [s. l.], v. 8, p. 104175–104197, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998723.

WELSBY, D.; PRICE, J.; PYE, S.; EKINS, P. Unextractable fossil fuels in a 1.5 °C world. Nature, [s. l.], v. 597, n. 7875, p. 230–234, 2021. DOI: 10.1038/s41586-021-03821-8. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41586-021-03821-8.

Capítulo 21

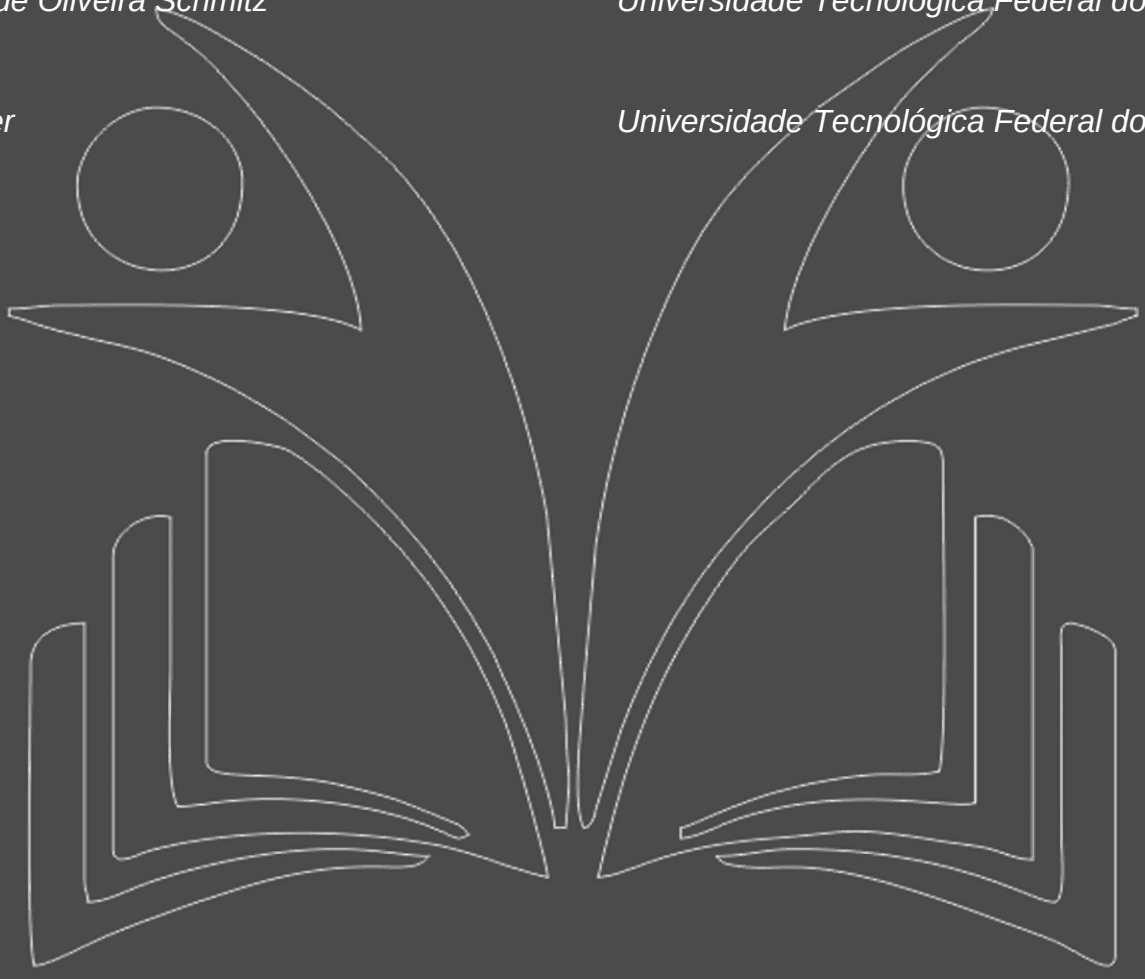
10.37423/260911419

RACIOCÍNIO FÍSICO E CONSTRUÇÃO DE MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA NA FORMAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Calisto Nonato Silva Junior — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

Ana Paula de Oliveira Schmitz — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

André Zuber — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná*



RESUMO

A formulação de problemas de transferência de massa exige relacionar fenômenos físicos, representações gráficas e hipóteses matemáticas. Este capítulo discute como materiais visuais podem apoiar essa articulação na formação em Engenharia Química, conectando Termodinâmica, Fenômenos de Transporte e Reatores Químicos. A abordagem consiste em uma análise técnico-pedagógica de recursos didáticos produzidos com auxílio do NotebookLM e submetidos à curadoria docente, ampliada por desenvolvimentos conceituais e exemplos de modelagem. A equação de conservação da espécie química organiza a discussão sobre força motriz, fluxo, acúmulo e reação. A contribuição adicional concentra-se na passagem das imagens às decisões de modelagem, com atenção à independência entre regime temporal e dimensionalidade espacial, à evaporação na célula de Arnold, às funções do gradiente e do laplaciano e à formulação de condições de contorno. A difusão transiente é examinada por meio dos números de Biot e Fourier mássicos, da escolha da geometria e dos limites das aproximações usuais. Esquemas revisados e situações didáticas explicitam interpretações que podem permanecer ambíguas em infográficos sintéticos, como a distinção entre fluxo total e difusivo e a possibilidade de curvaturas não nulas em um campo estacionário bidimensional. Propõe-se um percurso de ensino orientado à justificativa das hipóteses e à verificação física dos resultados. A análise é documental e propositiva, sem mensuração de aprendizagem discente. Conclui-se que o valor educacional das representações visuais depende de sua integração com o balanço de espécie, da explicitação das condições de validade e da mediação docente.

Palavras-chave: Ensino de Engenharia Química; Transferência de massa; Modelagem matemática; Mediação visual; Curadoria docente.

1 INTRODUÇÃO

Aprender transferência de massa envolve reconhecer o que uma equação descreve e decidir quando ela pode representar um processo. Em problemas de secagem, absorção, extração, evaporação ou reação em meios porosos, a dificuldade frequentemente antecede o cálculo: é preciso delimitar o sistema, identificar as espécies, selecionar as variáveis relevantes e justificar os mecanismos incluídos no balanço. Uma solução matematicamente correta pode descrever um problema físico diferente daquele proposto se essas escolhas não forem explicitadas (Bird; Stewart; Lightfoot, 2002; Cussler, 2009).

Essa passagem entre observação e formalização demanda a coordenação de diferentes linguagens. O desenho informa a geometria e a posição das interfaces; o perfil de concentração sugere a direção do transporte; o balanço expressa a conservação; e as condições de contorno traduzem as interações com a vizinhança. A leitura de cada representação ganha sentido quando o estudante consegue transitar entre elas. Por exemplo, uma seta indicando a saída de uma espécie deve ser compatível com o sinal do fluxo, com a orientação do eixo e com a redução da quantidade de matéria no domínio considerado (Ainsworth, 2006).

A difusão também atravessa fronteiras curriculares. A Termodinâmica discute a tendência à redistribuição da matéria e o equilíbrio entre fases. Os Fenômenos de Transporte relacionam essa tendência às taxas de transferência e à distribuição espacial das propriedades. Os Reatores Químicos acrescentam a transformação das espécies e o acoplamento entre transporte e cinética. A equação de conservação da espécie permite reunir essas perspectivas sem eliminar as particularidades de cada disciplina (Prausnitz; Lichtenthaler; Azevedo, 1999; Fogler, 2016).

O uso de representações visuais pode apoiar essa integração quando imagens e explicações são selecionadas de acordo com um objetivo de aprendizagem. Mayer (2009) fundamenta a articulação entre palavras e imagens na aprendizagem multimídia, enquanto Sweller (1988) oferece elementos para examinar a carga cognitiva envolvida na resolução de problemas. Esses referenciais não autorizam a suposição de que todo infográfico melhora a aprendizagem. Uma figura com excesso de informação, símbolos inconsistentes ou analogias pouco delimitadas pode acrescentar dificuldades àquelas já presentes no conteúdo.

A proposta aqui desenvolvida amplia o trabalho de Silva Junior, Schmitz e Zuber (2026), centrado na produção e análise de materiais visuais com apoio do NotebookLM. O foco deste capítulo recai sobre

o raciocínio necessário para converter uma representação em um modelo de transferência de massa. Mantém-se a discussão sobre curadoria e mediação docente, acrescentando-se uma análise das escolhas de regime, dimensionalidade, geometria e condições de fronteira. Aqui, o objetivo é organizar um percurso em que o estudante explique as hipóteses adotadas, interprete os termos da equação e examine a coerência física da solução.

2 BASES FÍSICAS PARA UMA LEITURA INTEGRADA DA TRANSFERÊNCIA DE MASSA

2.1 A força motriz e o significado de equilíbrio

A imagem de uma espécie inicialmente concentrada em uma região e progressivamente distribuída pelo sistema é uma introdução útil à difusão. Sua interpretação, entretanto, requer distinguir o movimento molecular do transporte líquido. As moléculas permanecem em movimento mesmo no equilíbrio; o que desaparece, nas condições apropriadas, é a transferência líquida resultante de um desequilíbrio. Portanto, setas macroscópicas não devem ser interpretadas como trajetórias ordenadas de todas as moléculas (Cussler, 2009).

Em sistemas isotérmicos e isobáricos, sem outras forças relevantes, diferenças de potencial químico fornecem a base termodinâmica para discutir a redistribuição de uma espécie. A relação entre potencial químico e atividade explicita porque concentração e força motriz não são conceitos universalmente equivalentes (Prausnitz; Lichtenthaler; Azevedo, 1999):

$$\mu_A = \mu_A^\circ + RT \ln a_A \qquad (1)$$

Nessa expressão, a atividade é adimensional e depende do estado padrão adotado. Em situações idealizadas, sua relação com a composição permite interpretar diferenças de concentração como indicadores da tendência de transporte. Em misturas não ideais e em sistemas com mais de uma fase, essa simplificação exige cuidado. Duas fases em equilíbrio podem apresentar concentrações distintas da mesma espécie, embora seus potenciais químicos sejam iguais (Prausnitz; Lichtenthaler; Azevedo, 1999; Smith et al., 2018).

Didaticamente, o professor pode iniciar pela distribuição espacial da matéria e avançar para a pergunta sobre o que significa equilibrar o sistema. Essa sequência preserva a utilidade da imagem inicial e evita a generalização de que equilíbrio corresponde sempre à igualdade de concentrações. Também prepara

a discussão posterior sobre a interface sólido-fluido, na qual uma relação de partição pode ser necessária para comparar concentrações expressas em fases diferentes (Prausnitz; Lichtenthaler; Azevedo, 1999).

2.2 Fluxos e conservação da espécie

Para uma mistura binária, uma formulação molar da lei de Fick relaciona o fluxo difusivo ao gradiente de fração molar. Quando a concentração molar total é constante, pode-se escrever a mesma relação em termos da concentração molar da espécie. A decomposição abaixo distingue o fluxo difusivo, referido à velocidade média molar, do fluxo total em um referencial fixo:

$$\begin{aligned} \mathrm{J}_A &= -cD_{AB}\nabla y_A = -D_{AB}\nabla C_A, \\ \mathrm{N}_A &= \mathrm{J}_A + y_A\mathrm{N}, \qquad \mathrm{N} = \mathrm{N}_A + \mathrm{N}_B \end{aligned} \qquad (2)$$

O símbolo DAB representa a difusividade binária; c, a concentração molar total; CA, a concentração molar de A; e yA, sua fração molar. Os fluxos molares têm unidade de mol por unidade de área e de tempo. A segunda igualdade na expressão de J pressupõe c constante, e a lei constitutiva empregada pressupõe as condições de validade da descrição fickiana adotada. A distinção entre os fluxos torna-se decisiva na difusão de um vapor através de um gás portador B cujo fluxo molar total é nulo (NB = 0), discutida adiante (Bird; Stewart; Lightfoot, 2002; Cussler, 2009).

Em um volume de controle fixo, o balanço local da espécie assume a forma (Bird; Stewart; Lightfoot, 2002):

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathrm{N}_A + r_A \qquad (3)$$

A variação temporal da concentração depende do balanço de transporte e da taxa líquida de produção por reação, expressa por unidade de volume. O sinal negativo diante da divergência indica que uma saída líquida de espécie reduz seu inventário local. A interpretação física da equação exige examinar o que atravessa todas as faces do volume, e não apenas reconhecer a existência de um fluxo em uma delas (Bird; Stewart; Lightfoot, 2002).

Quando o transporte macroscópico pode ser desprezado, o meio é isotrópico e a difusividade é constante, a combinação das Equações 2 e 3 fornece uma equação de difusão com reação. Se a

difusividade varia no espaço ou com a concentração, ela deve permanecer dentro do operador de divergência. Em meios porosos, uma difusividade efetiva e a base de definição da concentração precisam ser especificadas; o balanço não deve omitir fatores de armazenamento, porosidade ou sorção quando estes integram a descrição física (Cremasco, 2015).

2.3 O termo de reação e a localização da transformação

A taxa líquida de produção de uma espécie é positiva quando ela é gerada e negativa quando é consumida. Para a transformação irreversível A em B, com estequiometria unitária, o consumo de A corresponde a uma taxa negativa para essa espécie e a uma taxa positiva para B. É possível definir uma velocidade de reação positiva para representar o avanço da transformação, mas ela não deve ser confundida com a taxa líquida de produção de cada componente (Levenspiel, 1999; Fogler, 2016).

Também importa identificar onde ocorre a reação. Uma transformação distribuída pelo volume é representada por um termo volumétrico. Uma reação restrita a uma superfície pode entrar como condição de fluxo na fronteira. Em catalisadores porosos, a reação nas superfícies internas pode ser incorporada a um termo efetivo por volume, desde que se explicitem a conversão entre bases e as hipóteses do modelo. Essas alternativas não são intercambiáveis sem uma justificativa física (Fogler, 2016).

Essa leitura permite conectar o balanço a situações de engenharia. Uma redução de concentração ao longo de uma partícula pode refletir o consumo reacional associado ao transporte; já uma mudança temporal pode resultar de acúmulo, mesmo na ausência de reação. A figura deve ajudar a localizar os mecanismos, enquanto a equação estabelece como eles se combinam (Fogler, 2016; Cussler, 2009).

3 DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DOS RECURSOS DIDÁTICOS

3.1 Natureza da proposta e organização do acervo

O trabalho que fundamenta este capítulo caracteriza-se como desenvolvimento de produto educacional acompanhado de análise técnico-pedagógica reflexiva. A aproximação com a pesquisa de desenvolvimento decorre da concepção, organização e revisão de artefatos de ensino, conforme discutido por Richey e Klein (2007). A relação com Peffers et al. (2007) reside na orientação ao

problema e na análise do artefato produzido, sem pressupor a execução integral de um protocolo de design science ou de uma avaliação experimental.

No percurso originalmente relatado, os docentes selecionaram fontes e conteúdo das áreas de Termodinâmica, Fenômenos de Transporte e Reatores Químicos. O NotebookLM apoiou a síntese textual, a organização de relações conceituais e a elaboração de propostas de infográficos. Aos autores couberam a delimitação dos objetivos, a escolha das fontes, a formulação dos comandos e a revisão das representações. O uso da ferramenta integrou uma atividade de preparação didática, e sua produção foi tratada como material sujeito à verificação (Vorel; Shafqat, 2025; Silva Junior, Schmitz, Zuber, 2026).

O acervo compreende representações sobre força motriz, conservação da espécie, lei de Fick, regimes de difusão, reação, fronteiras móveis, difusão transiente e problemas bidimensionais. Os materiais complementares examinados para esta ampliação incluem comparações da célula de Arnold, guias de modelagem e infográficos sobre derivadas e números adimensionais. Versões repetidas de uma mesma imagem não constituem unidades independentes de análise.

Neste capítulo, esses materiais servem de base para uma discussão mais extensa das decisões de modelagem. As figuras foram redesenhadas com notação consistente e hipóteses explícitas. Quando apresentam curvas, estas correspondem a funções ou soluções analíticas identificadas nas legendas, sem representar observações experimentais. Ferramentas de inteligência artificial também apoiaram a reorganização textual da versão ampliada; a responsabilidade pela revisão científica e pela versão submetida permanece com os autores (Miao; Holmes, 2023).

Não foram coletados dados de estudantes, respostas a questionários, notas, entrevistas ou outras medidas de desempenho para sustentar as análises aqui apresentadas. As interpretações referem-se ao conteúdo dos materiais e a possibilidades de uso docente. Consequentemente, o capítulo não atribui ganhos de aprendizagem à ferramenta nem trata percepções informais como resultados de uma avaliação educacional.

3.2 Critérios de análise e rastreabilidade das escolhas

A revisão de uma imagem didática deve examinar simultaneamente sua correção científica e sua função no percurso de ensino. Uma representação pode ser correta em determinado contexto e

inadequada como síntese geral; pode também ser visualmente clara e induzir uma associação equivocada (Ainsworth, 2006; Mayer, 2024). A matriz apresentada no Quadro 1 operacionaliza os critérios da proposta original, vinculando cada dimensão a uma verificação observável.

Quadro 1. Critérios para revisão técnico-pedagógica de materiais visuais

Dimensão	Verificação no material	Decisão de revisão
Correção conceitual	Sinais, unidades, definições e mecanismos coerentes	Corrigir ou retirar afirmações incompatíveis com o modelo
Clareza visual	Eixos, setas, cores e legendas com significado explícito	Reduzir elementos que competem com a informação central
Relação entre equação e fenômeno	Cada termo associado a um processo identificável	Acrescentar a interpretação física ausente
Integração disciplinar	Força motriz, transporte e reação conectados pelo balanço	Explicitar a contribuição de cada área
Mediação didática	Figura vinculada a uma pergunta ou tarefa	Definir o que o estudante deve explicar com a imagem
Limites da simplificação	Hipóteses e exceções relevantes identificadas	Qualificar analogias e restringir generalizações
Aplicabilidade	Legibilidade e adequação ao momento da aprendizagem	Adaptar a densidade de informação e a sequência de uso

Fonte: reorganizado a partir de Silva Junior, Schmitz e Zuber (2026).

A rastreabilidade pode ser mantida por registros simples das fontes, do objetivo didático, da versão examinada e das alterações efetuadas. Esse registro ajuda a distinguir uma mudança estética de uma correção conceitual. Substituir uma cor, por exemplo, não tem o mesmo alcance que corrigir o sinal de um termo de reação ou redefinir a origem de uma coordenada. A revisão torna-se mais útil quando documenta o motivo da alteração e a interpretação que se pretende evitar (Richey; Klein, 2007).

Os critérios não são tratados como uma escala psicométrica nem como pontuações produzidas por avaliadores independentes. Sua função é estruturar a leitura dos materiais e orientar decisões de uso. Uma eventual investigação de concordância entre avaliadores ou de efeito sobre aprendizagem exigiria delineamento próprio, que ultrapassa o escopo desta proposta.

4 MEDIAÇÃO DOCENTE E CRÍTICA DAS REPRESENTAÇÕES

A principal contribuição do acervo original é oferecer diferentes pontos de entrada para um mesmo balanço físico. A distribuição de partículas introduz a força motriz; o perfil de concentração permite

discutir o gradiente; a representação de um volume de controle situa o acúmulo; e a transformação entre espécies torna visível o termo de reação (Silva Junior; Schmitz; Zuber, 2026). A integração ocorre quando essas imagens são retomadas como partes de uma mesma explicação, e não apenas apresentadas em sequência (Ainsworth, 2006).

Um exemplo documentado no trabalho do WENDEQ diz respeito à ambiguidade do sinal da taxa de reação em uma representação de A se transformando em B. A revisão reforçou a convenção de taxa líquida de geração, distinguindo o consumo do reagente da formação do produto (Silva Junior; Schmitz; Zuber, 2026). O episódio mostra uma função concreta da curadoria: verificar se imagem, legenda e símbolo matemático expressam a mesma transformação. A aparência organizada do recurso não dispensa essa conferência.

Outro ponto envolve a representação microscópica do transporte. Setas podem indicar o sentido do fluxo líquido, mas não significam que todas as moléculas se desloquem exclusivamente nesse sentido. A explicação docente deve separar a agitação molecular da resultante macroscópica. De modo semelhante, expressões como “equilíbrio de forças” podem servir como analogia para a relação entre força motriz e resistência, mas não descrevem um balanço mecânico de forças aplicado à difusão (Cussler, 2009).

A economia visual também impõe limites. Um gráfico esquemático pode indicar que a concentração muda ao longo do tempo sem constituir uma carta de cálculo. Para uso quantitativo, é necessário conhecer a solução que gerou as curvas, as escalas, a geometria e as condições de fronteira. A passagem de um desenho ilustrativo a um instrumento de cálculo precisa ser declarada, sobretudo quando os dois aparecem lado a lado em um infográfico (Crank, 1975).

Essas exigências correspondem ao trabalho de transformar conhecimento especializado em formas ensináveis, discutido por Shulman (1986). O professor seleciona a analogia, delimita seu alcance e decide quando introduzir a formulação completa. A contribuição da inteligência artificial, nesse processo, depende da capacidade de produzir alternativas que possam ser examinadas e aprimoradas; ela não substitui o conhecimento necessário para reconhecer uma explicação inadequada (Miao; Holmes, 2023).

Na prática, a leitura de uma figura pode ser organizada por três perguntas encadeadas: o que acontece com a espécie, qual termo do balanço representa esse processo e sob quais hipóteses a representação

é válida. A primeira pergunta mantém o vínculo com o fenômeno; a segunda conduz à linguagem matemática; a terceira evita que um caso particular se transforme em regra geral (Ainsworth, 2006). A seção seguinte desenvolve esse procedimento em situações presentes nos materiais complementares.

5 REPRESENTAÇÕES VISUAIS E DECISÕES DE MODELAGEM

5.1 Escolha do regime temporal e da descrição espacial

A escolha de um modelo exige separar três decisões que aparecem frequentemente reunidas em uma única classificação visual. O regime temporal informa como o campo varia no tempo. A dimensionalidade indica quantas coordenadas espaciais precisam ser consideradas. A geometria determina a forma do domínio e os operadores adequados ao sistema de coordenadas. Um problema pode ser estacionário e bidimensional, transiente e unidimensional ou pseudo-estacionário com fronteira móvel (Bird; Stewart; Lightfoot, 2002; Cussler, 2009).

No regime estacionário, a concentração em cada posição fixa não varia com o tempo. Essa condição não elimina necessariamente os gradientes nem o fluxo. No regime transiente, o termo de acúmulo precisa ser considerado. A aproximação pseudo-estacionária, por sua vez, despreza o acúmulo em uma região cujo campo se ajusta rapidamente, enquanto acompanha a evolução lenta de uma fronteira ou de um parâmetro. Seu uso depende de uma separação entre escalas de tempo (Cussler, 2009).

A dimensionalidade deve ser justificada por simetrias, condições de fronteira e ordens de grandeza. A aparência tridimensional de um objeto não implica que seu modelo tenha de considerar três coordenadas. Uma esfera submetida a condições uniformes em toda a superfície pode apresentar um problema unidimensional radial. Inversamente, uma placa pode exigir duas coordenadas quando suas bordas impõem condições diferentes (Bird; Stewart; Lightfoot, 2002). O Quadro 2 reúne as decisões que antecedem a seleção de uma solução.

Quadro 2. Decisões físicas anteriores à solução matemática

Aspecto	Pergunta de modelagem	Consequência
Regime	O campo varia no tempo e em qual escala?	Manter, eliminar ou aproximar o acúmulo
Dimensionalidade	Em quais direções existem variações relevantes?	Definir as coordenadas presentes no balanço

Aspecto	Pergunta de modelagem	Consequência
Geometria	O domínio é plano, cilíndrico, esférico ou irregular?	Escolher o operador espacial apropriado
Movimento global	Há contribuição advectiva relevante?	Distinguir fluxo total e fluxo difusivo
Reação	A espécie é gerada ou consumida e onde?	Inserir termo volumétrico ou condição superficial
Fronteiras	Há concentração imposta, isolamento, simetria ou filme externo?	Formular condições compatíveis com cada superfície
Propriedades	Difusividade e relações de equilíbrio podem ser constantes?	Definir o nível de simplificação admissível

Fonte: elaboração própria com base em Bird, Stewart e Lightfoot (2002), Cussler (2009) e Cremasco (2015).

Esse procedimento evita tratar “bidimensional” como alternativa a “transiente” ou assumir a equação de Laplace apenas porque há duas direções espaciais. A seleção de uma equação resulta da combinação das decisões, e não de uma palavra isolada no enunciado (Bird; Stewart; Lightfoot, 2002).

5.2 Célula de Arnold e evolução de uma fronteira móvel

Considere um líquido puro A que evapora na base de um tubo e se transfere através de uma mistura gasosa binária contendo B. Admitem-se temperatura e pressão constantes, gás ideal, difusividade constante, área transversal uniforme e ausência de reação no gás. A fração molar de A na interface é mantida em um valor determinado pelo equilíbrio líquido-vapor, e sua fração molar na abertura do tubo também é prescrita. A distância entre interface e abertura é representada por L (Cussler, 2009; Cremasco, 2015).

O termo “B estagnado” significa, nesta formulação, que o fluxo molar total de B em relação ao equipamento é nulo. Isso não significa ausência de movimento molecular nem velocidade média molar nula. Como apenas A apresenta fluxo total diferente de zero, a Equação 2 leva à expressão abaixo, tomando a coordenada axial no sentido da interface para a abertura:

$$N_{B,z} = 0, \qquad N_{A,z} = -\frac{cD_{AB}}{1 - y_A}\frac{dy_A}{dz}. \qquad (4)$$

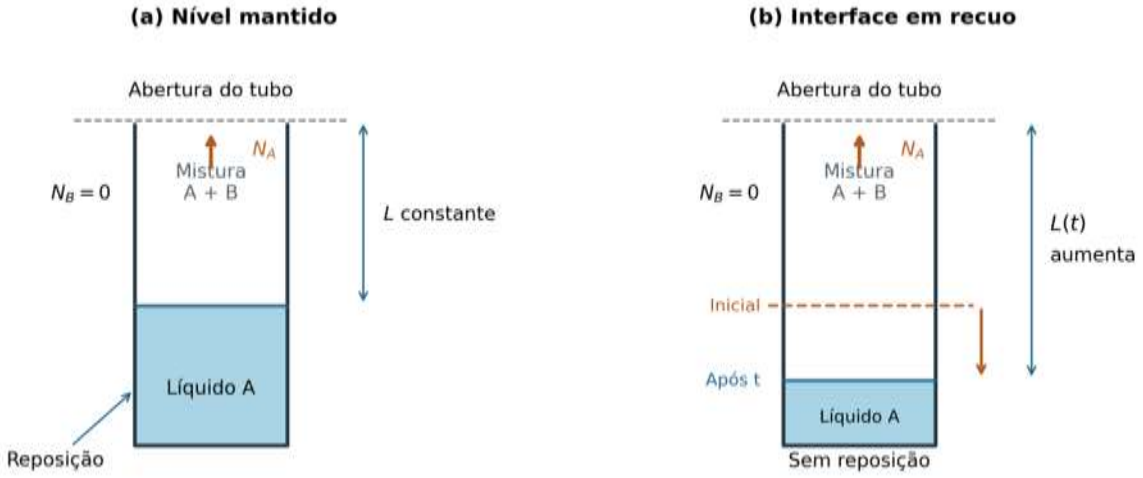
Integrando entre as composições da interface e da abertura, obtém-se:

$$N_{A,z} = \frac{cD_{AB}}{L} \ln\left(\frac{1 - y_{A,\infty}}{1 - y_{A,s}}\right), \qquad c = \frac{P}{RT}. \qquad (5)$$

Para evaporação, a fração molar na interface é maior que na abertura; o logaritmo e o fluxo definido nesse sentido são positivos. O argumento do logaritmo é uma razão adimensional entre frações molares de B. Ele não é, por si só, um gradiente de concentração. A forma logarítmica decorre da condição de fluxo total nulo de B e não deve ser omitida indiscriminadamente. No limite de vapor suficientemente diluído, pode-se avaliar uma aproximação linear, explicitando o intervalo de composição em que ela é aceitável (Cussler, 2009; Cremasco, 2015).

Com reposição de líquido, L pode permanecer constante. Se as demais condições também forem mantidas e o transiente inicial tiver decorrido, o fluxo é constante. Sem reposição, a interface recua e a coluna gasosa aumenta (Cremasco, 2015). A Figura 1 evidencia que a altura do líquido diminui enquanto o comprimento de difusão cresce, distinção importante para o sinal do balanço.

Figura 1. Comparação entre nível mantido e fronteira móvel na célula de Arnold. L é a distância positiva da abertura até a interface. As setas de fluxo indicam a transferência líquida de A. Os desenhos são esquemáticos e fora de escala.



Fonte: elaboração própria com base em Cussler (2009) e Cremasco (2015).

Na aproximação pseudo-estacionária, a Equação 5 é aplicada ao comprimento instantâneo. O balanço do líquido puro, de densidade constante, fornece, desprezando a correção devida à quantidade de vapor arrastada pelo movimento da interface (Cussler, 2009; Cremasco, 2015):

$$\frac{\rho_L}{M_A}\frac{dL}{dt} \simeq N_{A,z}(t) \qquad (6)$$

A densidade mássica dividida pela massa molar converte a variação de volume de líquido em quantidade de matéria. Essa conversão é importante pois o produto de fluxo molar por área e tempo tem unidade de quantidade de matéria, e não de massa. Assim, a aproximação é apropriada quando a concentração molar do líquido é muito maior que a do vapor e o movimento da interface é lento (Cremasco, 2015).

Substituindo a Equação 5 no balanço e mantendo as propriedades e composições de fronteira constantes, resulta:

$$L^2(t) - L_0^2 \simeq \frac{2M_A c D_{AB}}{\rho_L} \ln\left(\frac{1 - y_{A,\infty}}{1 - y_{A,s}}\right) t \qquad (7)$$

O crescimento do quadrado de L com o tempo não implica que o fluxo permaneça constante: pela Equação 5, ele diminui à medida que a coluna gasosa aumenta. A consistência da aproximação pode ser examinada comparando a escala de ajuste difusivo, da ordem de L^2/D, com a escala de deslocamento da interface, da ordem de L dividido por sua velocidade. A primeira deve ser muito menor que a segunda. Se essa separação não se sustenta, é necessário manter o acúmulo no gás e tratar o problema de fronteira móvel com maior detalhe (Cussler, 2009; Crank, 1975).

Em aula, esse exemplo permite pedir que o estudante antecipe o efeito do recuo da interface antes de integrar o balanço. A previsão de um fluxo decrescente oferece um critério de verificação da solução e conecta geometria, resistência ao transporte e conservação de matéria (Ainsworth, 2006).

5.3 Derivadas e redistribuição em duas dimensões

O tema de derivadas em difusão de massa permite explorar uma distinção principal: a primeira derivada informa a inclinação do perfil em uma direção, enquanto a segunda descreve a variação dessa inclinação. No modelo fickiano, o gradiente está associado ao fluxo. O acúmulo, entretanto, depende do desequilíbrio entre os fluxos que chegam e saem de uma região, representado pela divergência (Bird; Stewart; Lightfoot, 2002).

Para um meio sem movimento macroscópico, isotrópico, com difusividade constante, sem reação e com variação em duas coordenadas cartesianas, a equação transiente é:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2}\right) \qquad (8)$$

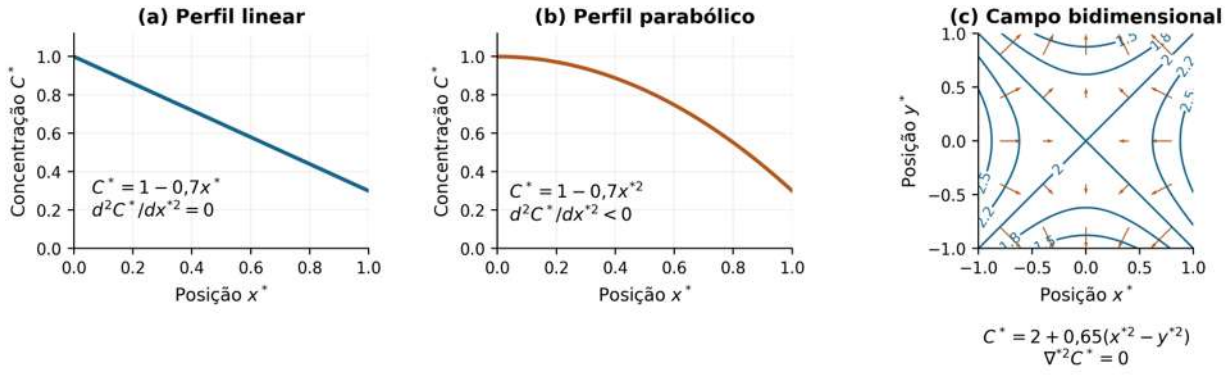
É a soma das derivadas segundas, o laplaciano, que determina o acúmulo nessas condições. Uma curvatura diferente de zero em apenas uma direção não basta para concluir que a concentração muda com o tempo, pois outra contribuição pode compensá-la (Bird; Stewart; Lightfoot, 2002).

Considere, por exemplo, o campo definido em uma região finita:

$$\begin{aligned} C_A(x,y) &= C_0 + \alpha(x^2 - y^2), \\ \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} &= 2\alpha, \qquad \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} = -2\alpha \end{aligned} \qquad (9)$$

Escolhendo C_0 suficientemente elevado para manter concentrações positivas e impondo nas bordas os valores correspondentes, tem-se um campo estacionário com curvaturas não nulas. Sua soma é zero. Os fluxos podem atravessar o domínio, mas não produzem acúmulo local (Bird; Stewart; Lightfoot, 2002). Esse contraexemplo ajuda a substituir a regra imprecisa “curvatura implica transiente” por uma interpretação baseada no balanço completo.

Figura 2. Perfis e campo analítico para distinguir inclinação, curvatura e acúmulo. À esquerda, um perfil linear apresenta gradiente constante e derivada segunda nula. Ao centro, um perfil parabólico tem curvatura negativa e, sob as hipóteses da Equação 8 em uma dimensão, concentração local decrescente. À direita, o campo da Equação 9, em coordenadas e concentração ilustrativas, apresenta curvaturas que se compensam. As setas representam o sentido do fluxo difusivo.



Fonte: elaboração própria, com interpretação baseada em Bird, Stewart e Lightfoot (2002); não são dados experimentais.

No regime estacionário e sob as hipóteses da Equação 8, obtém-se a equação de Laplace (Crank, 1975):

$$\nabla^2 C_A = \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} = 0. \qquad (10)$$

Ela admite distribuições espaciais não uniformes, determinadas pelas condições de contorno. Uma imagem de uma mancha que se espalha a partir de um ponto, por outro lado, normalmente sugere evolução temporal. Se houver uma fonte interna mantida, o termo correspondente precisa integrar o modelo; a equação de Laplace sem fonte não descreve automaticamente todo o domínio. Assim, uma mesma analogia visual pode remeter a problemas diferentes, e cabe à formulação identificar qual deles está em análise (Bird; Stewart; Lightfoot, 2002).

Em domínios e condições compatíveis, a separação de variáveis permite construir soluções a partir de produtos de funções espaciais e de sua combinação em séries. Essa técnica não elimina a necessidade de especificar as bordas. O formato final da solução responde à geometria, às hipóteses e às condições impostas, e não apenas à presença de duas coordenadas (Crank, 1975).

5.4 Condições de contorno como descrição das fronteiras

Uma equação diferencial expressa o comportamento no interior do domínio, mas não determina sozinha a solução do problema. É necessário informar a condição inicial, quando há transiente, e o que acontece nas fronteiras. Concentração imposta, superfície impermeável e transferência através de um filme externo representam situações físicas distintas e não podem ser escolhidas apenas por conveniência algébrica.

Adotando a normal orientada para fora do domínio e desprezando acúmulo e reação na interface, podem-se escrever três condições de contorno usuais para um meio sem transporte macroscópico (Cremasco, 2015):

$$\begin{aligned} &\text{Concentração imposta:} && C_A = C_{A,s}; \\ &\text{Fluxo normal nulo:} && -D\frac{\partial C_A}{\partial n} = 0; \\ &\text{Transferência externa:} && -D\frac{\partial C_A}{\partial n} = h_m\left(C_{A,s} - C_{A,\infty}\right) \end{aligned} \qquad (11)$$

A última expressão estabelece a continuidade do fluxo entre a difusão interna e a transferência externa. O coeficiente de transferência de massa deve estar definido na mesma base de concentração utilizada na diferença. Quando as concentrações interna e externa pertencem a fases diferentes, é preciso introduzir a relação de equilíbrio ou de partição apropriada, ou converter o coeficiente e a força motriz para uma base comum (Cussler, 2009; Prausnitz; Lichtenthaler; Azevedo, 1999).

Essa condição traduz uma situação recorrente em ensino: aquilo que alcança a superfície por difusão é transferido para o fluido externo, desde que a interface não acumule nem transforme a espécie. Não se trata de uma igualdade automática em qualquer sistema. Uma interface reativa, uma membrana com armazenamento ou uma fronteira em movimento pode exigir termos adicionais (Bird; Stewart; Lightfoot, 2002; Fogler, 2016).

A condição de derivada normal nula também merece interpretação. Em uma parede impermeável, ela expressa ausência de transferência através da parede. Em um plano de simetria, o mesmo resultado matemático decorre da equivalência entre as duas metades do sistema. A origem física é diferente, embora a forma da condição coincida. A comparação oferece uma oportunidade para avaliar se o estudante reconhece a fronteira representada (Crank, 1975).

5.5 Números adimensionais e geometria na difusão transiente

O conteúdo sobre difusão transiente reúne três elementos úteis para comparar problemas: a concentração adimensional, o tempo adimensional e a relação entre resistências interna e externa. Para um corpo de geometria fixa, difusividade constante e condição externa constante, uma definição conveniente é (Cremasco, 2015):

$$\theta = \frac{C_A - C_{A,eq}}{C_{A,0} - C_{A,eq}}, \qquad \mathrm{Fo}_m = \frac{Dt}{L_c^2}, \qquad \mathrm{Bi}_m = \frac{h_m L_c}{D}. \qquad (12)$$

A concentração de equilíbrio representa o valor que o material tende a atingir sob a condição externa considerada. Sua igualdade com a concentração no fluido não deve ser presumida quando há partição entre fases. A definição apresentada de Biot também pressupõe que o coeficiente externo e a difusividade sejam compatíveis com a mesma base de concentração; relações de partição podem modificar a forma operacional do grupo (Cremasco, 2015).

O número de Fourier compara o tempo transcorrido com a escala de difusão interna. O número de Biot compara, em ordem de grandeza, a resistência interna com a externa. Valores pequenos de Biot mássico indicam que a resistência externa é relativamente elevada e que gradientes internos podem ser pequenos. Valores grandes indicam que a resistência externa é relativamente pequena e que a distribuição interna precisa ser considerada. Esses grupos respondem a perguntas diferentes: Biot não

mede o tempo transcorrido, assim como o Fourier mássico não identifica sozinho a resistência predominante (Cremasco, 2015; Crank, 1975).

O comprimento característico deve seguir a convenção da solução empregada. Nas soluções usuais para uma placa exposta igualmente nas duas faces, utiliza-se frequentemente a meia espessura; para cilindro infinito e esfera, o raio. Em aproximações de capacidade concentrada, é comum empregar a razão entre volume e área de transferência. Misturar essas definições altera os valores dos grupos e pode levar ao uso incorreto de uma carta ou correlação (Cremasco, 2015).

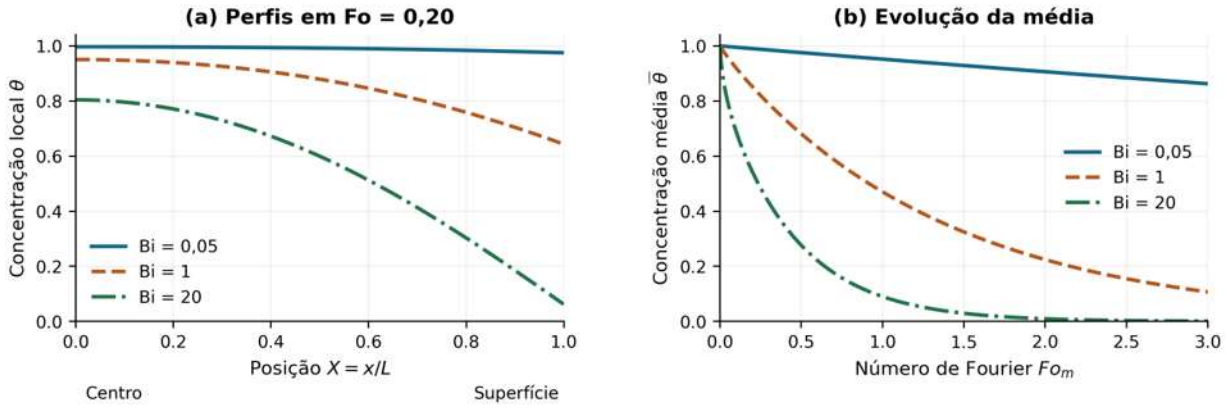
Para uma placa de meia espessura L, com concentração inicial uniforme, simetria no plano central e transferência externa idêntica nas duas faces, a solução unidimensional pode ser escrita como (Crank, 1975):

$$\begin{aligned} \theta(X, \mathrm{Fo}_m) &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\lambda_n X) e^{-\lambda_n^2 \mathrm{Fo}_m}, \\ X &= \frac{x}{L}, \qquad \lambda_n \tan\lambda_n = \mathrm{Bi}_m, \\ A_n &= \frac{4\sin\lambda_n}{2\lambda_n + \sin(2\lambda_n)}. \end{aligned} \tag{13}$$

Aqui, x é medido a partir do plano central. A série permite relacionar a condição de superfície à evolução do perfil. Para Biot pequeno, a concentração tende a ser quase uniforme no interior, embora possa diferir bastante da condição externa. Para Biot elevado, a superfície se aproxima rapidamente do equilíbrio com o meio e o centro responde mais lentamente (Crank, 1975). A Figura 3 apresenta soluções dessa equação, com a mesma definição de comprimento em todos os casos.

Figura 3. Efeito do número de Biot na difusão transiente em placa plana. À esquerda, perfis para Fourier mássico igual a 0,20; à direita, evolução da concentração adimensional média no volume. Curvas calculadas pela Equação 13, com

concentração inicial uniforme, propriedades constantes, condição externa constante e ausência de reação. O comprimento característico é a meia espessura.



Fonte: cálculos dos autores a partir da solução para placa plana com transferência na superfície (Crank, 1975); não são dados experimentais..

5.6 Exemplo 1 - Difusão e transferência externa

Considere uma camada plana, em regime estacionário, sem reação, com espessura de 2,0 mm e difusividade igual a $1{,}0 \times 10^{-9}$ m²/s. Na face interna mantém-se a concentração de 20 mol/m³. Na face externa, a espécie é removida para um fluido cuja concentração é 2 mol/m³, com coeficiente de transferência de massa de $2{,}0 \times 10^{-6}$ m/s. Para este exemplo, admitem-se concentrações na mesma base e ausência de salto de partição entre as fases. Os valores são hipotéticos e foram escolhidos para ilustração didática.

A concentração na superfície externa é desconhecida. Ela deve ser obtida pela continuidade do fluxo entre a camada e o filme externo. Definindo o fluxo positivo da face interna para o fluido (Cussler, 2009; Cremasco, 2015):

$$\begin{aligned} N_A &= \frac{D}{L}\left(C_{A,i} - C_{A,s}\right) = h_m\left(C_{A,s} - C_{A,\infty}\right), \\ N_A &= \frac{C_{A,i} - C_{A,\infty}}{L/D + 1/h_m}. \end{aligned} \qquad (14)$$

A resistência difusiva por unidade de área é $2{,}0 \times 10^{6}$ s/m, enquanto a resistência externa é $5{,}0 \times 10^{5}$ s/m. A soma resulta em $2{,}5 \times 10^{6}$ s/m. Dividindo a diferença de concentração, igual a 18 mol/m³, pela resistência total, obtém-se um fluxo de $7{,}2 \times 10^{-6}$ mol/(m²·s). A concentração superficial calculada pela expressão externa é:

$$C_{A,s} = 2 + \frac{7{,}2 \times 10^{-6}}{2{,}0 \times 10^{-6}} = 5{,}6\ \mathrm{mol\,m^{-3}} \qquad (15)$$

O resultado pode ser verificado sem repetir todo o cálculo: a concentração superficial está entre as concentrações da face interna e do fluido; a diferença na camada é 14,4 mol/m³ e a diferença no filme externo é 3,6 mol/m³; cada diferença, dividida pela respectiva resistência, produz o mesmo fluxo. O número de Biot baseado na espessura da camada é igual a 4, coerente com uma resistência interna quatro vezes maior que a externa. Nesse caso estacionário específico, a resistência interna representa 80% da soma.

Se a resistência externa fosse desprezada, a concentração superficial seria igualada à do fluido e o fluxo calculado seria 9,0 × 10^{-6} mol/(m²·s), 25% acima do resultado com ambas as resistências. A comparação mostra que “predominante” não significa necessariamente que a outra resistência possa ser omitida para qualquer precisão desejada. Ao mesmo tempo, deve-se evitar transportar o perfil linear deste exemplo para um problema transiente, no qual o armazenamento interno altera a distribuição de concentração (Crank, 1975).

6 ORGANIZAÇÃO DE UM PERCURSO DIDÁTICO ORIENTADO À MODELAGEM

Os recursos podem ser utilizados em um percurso que comece pela leitura do fenômeno e avance até a avaliação da solução. A proposta não depende da exibição simultânea de todos os infográficos. A seleção deve considerar o conhecimento prévio da turma e a tarefa pretendida, de modo que a imagem ajude a formular uma pergunta e não apenas reúna fórmulas para consulta (Mayer, 2009; Sweller, 1988).

No primeiro momento, apresenta-se o sistema sem sua equação final. Solicita-se que os estudantes identifiquem onde a espécie está, por onde ela pode entrar ou sair e se existe transformação química. Na célula de Arnold, por exemplo, devem distinguir a fase líquida da mistura gasosa e reconhecer que o desaparecimento do líquido não significa consumo por reação (Cussler, 2009). Essa leitura inicial permite recuperar conceitos de fase, interface e quantidade de matéria.

Em seguida, os estudantes desenham qualitativamente o perfil esperado e justificam suas características. Um perfil linear, uma superfície em duas coordenadas ou uma família de curvas no tempo deve resultar das hipóteses consideradas. O professor pode confrontar previsões com situações

em que há fluxo sem acúmulo ou gradiente nulo em um ponto sem ausência de evolução temporal na sua vizinhança (Ainsworth, 2006; Bird; Stewart; Lightfoot, 2002).

O terceiro momento consiste em formular o balanço, definir os fluxos e selecionar as condições de fronteira. O estudante registra quais termos foram mantidos e quais foram eliminados, explicando as razões físicas. O exemplo da camada plana permite discutir a concentração superficial como incógnita e verificar a continuidade entre transporte interno e externo. Já a célula de Arnold exige reconhecer que o fluxo difusivo não é automaticamente igual ao fluxo total (Bird; Stewart; Lightfoot, 2002; Cussler, 2009).

Na etapa de solução, podem-se empregar integração direta, séries, cartas verificadas ou ferramentas numéricas, conforme o nível da disciplina. A escolha do método deve ser acompanhada da identificação de seus limites. Um resultado numérico apresentado sem hipótese, unidade ou interpretação não encerra a modelagem. É necessário conferir sinais, ordens de grandeza, limites assintóticos e atendimento às condições de fronteira (Crank, 1975; Bird; Stewart; Lightfoot, 2002).

Por fim, propõe-se uma variação do problema. O professor altera a condição externa, introduz reação, retira a reposição do líquido ou modifica a geometria, e os estudantes explicam o que precisa mudar no modelo. Essa transferência entre situações permite observar como as hipóteses sustentam a solução anterior (Mayer, 2024). O Quadro 3 apresenta tarefas e respostas conceituais esperadas, como instrumentos de planejamento de uma aplicação futura.

Quadro 3. Situações para discussão e verificação conceitual

Situação proposta	Pergunta ao estudante	Elemento esperado na justificativa
Perfil linear mantido entre duas fronteiras	Pode haver fluxo sem acúmulo?	Fluxos de entrada e saída iguais, com gradiente não nulo
Célula de Arnold sem reposição	O fluxo aumenta ou diminui com o tempo?	A coluna gasosa cresce e o fluxo diminui nas hipóteses adotadas
Campo da Equação 9	Curvaturas não nulas exigem transiente?	As contribuições espaciais podem se compensar
Superfície com filme externo	A concentração superficial é igual à externa?	Depende da resistência externa e da relação de equilíbrio
Corpo com Biot pequeno	Concentração uniforme significa equilíbrio?	Pode haver transiente quase uniforme limitado externamente
Reação restrita à superfície	Onde inserir o consumo no modelo?	Na condição de fluxo, com convenção e base consistentes

Fonte: elaboração própria, com fundamentos físicos em Bird, Stewart e Lightfoot (2002), Cussler (2009) e Crank (1975).

As respostas indicam objetivos de ensino, não resultados observados em estudantes.

A avaliação formativa pode concentrar-se nas justificativas apresentadas: coerência entre desenho e equação, identificação da fronteira, consistência dimensional e interpretação da solução. A intenção é tornar visível o raciocínio utilizado (Black; Wiliam, 1998). A implementação e a investigação sistemática desse percurso, incluindo eventuais comparações de aprendizagem, constituem etapas futuras e requerem planejamento metodológico e ético compatível com a coleta pretendida.

7 ALCANCE DA PROPOSTA E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A reorganização dos materiais desloca a ênfase da produção de infográficos para a construção de modelos fisicamente interpretáveis. A contribuição do capítulo está em explicitar relações que podem permanecer implícitas em recursos sintéticos: o regime temporal não determina a dimensionalidade; um fluxo não implica acúmulo; uma curvatura isolada não define o comportamento de um campo bidimensional; e a concentração superficial depende da interação entre o domínio e sua vizinhança (Bird; Stewart; Lightfoot, 2002).

O desenvolvimento da célula de Arnold mostra como um esquema de fronteira móvel conduz a um balanço do líquido e a uma aproximação para o campo gasoso. A discussão das derivadas diferencia a informação fornecida pelo gradiente daquela associada ao laplaciano. A análise da difusão transiente reúne geometria, resistências e tempo adimensional, enquanto o exemplo de transferência externa

oferece uma verificação quantitativa da continuidade do fluxo. Esses elementos ampliam o acervo inicial e sustentam um percurso de ensino centrado na justificativa das hipóteses.

A análise permanece limitada ao conteúdo dos artefatos e à argumentação técnico-pedagógica e não permite estimar ganhos de aprendizagem, comparar turmas ou atribuir eficácia ao NotebookLM. A revisão pelos próprios autores também não equivale a uma validação independente. O valor demonstrado é o desenvolvimento de uma proposta organizada e de explicações verificáveis, cuja utilidade educacional poderá ser examinada em aplicações posteriores.

Conclui-se que materiais visuais podem integrar o ensino de transferência de massa quando são acompanhados de definições, condições de validade e oportunidades de explicação pelo estudante. A mediação docente estabelece a conexão entre imagem, balanço e solução, identificando onde a síntese ajuda e onde precisa ser ampliada. Nessa perspectiva, o recurso visual participa da formação do raciocínio de engenharia ao apoiar escolhas fundamentadas, e não apenas a memorização de expressões (Ainsworth, 2006; Mayer, 2024).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio institucional às atividades de ensino e de elaboração de materiais didáticos que deram origem a esta proposta.

REFERÊNCIAS

AINSWORTH, S. DeFT: a conceptual framework for considering learning with multiple representations. Learning and Instruction, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 183–198, 2006. DOI: 10.1016/j.learninstruc.2006.03.001. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.03.001. Acesso em: 27 set. 2026.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Transport phenomena. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.

BLACK, P.; WILIAM, D. Assessment and classroom learning. Assessment in Education: Principles, Policy & Practice, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 7–74, 1998. DOI: 10.1080/0969595980050102. Disponível em: https://doi.org/10.1080/0969595980050102. Acesso em: 27 set. 2026.

CRANK, J. The mathematics of diffusion. 2. ed. Oxford: Clarendon Press, 1975.

CREMASCO, M. A. Fundamentos de transferência de massa. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

CUSSLER, E. L. Diffusion: mass transfer in fluid systems. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

FOGLER, H. S. Elements of chemical reaction engineering. 5. ed. Boston: Prentice Hall, 2016.

LEVENSPIEL, O. Chemical reaction engineering. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.

MAYER, R. E. Multimedia learning. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

MAYER, R. E. The past, present, and future of the cognitive theory of multimedia learning. Educational Psychology Review, [s. l.], v. 36, art. 8, 2024. DOI: 10.1007/s10648-023-09842-1. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10648-023-09842-1. Acesso em: 27 set. 2026.

MIAO, F.; HOLMES, W. Guidance for generative AI in education and research. Paris: UNESCO, 2023. DOI: 10.54675/EWZM9535. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386693. Acesso em: 27 set. 2026.

PEFFERS, K.; TUUNANEN, T.; ROTHENBERGER, M. A.; CHATTERJEE, S. A design science research methodology for information systems research. Journal of Management Information Systems, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 45–77, 2007. DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302. Disponível em: https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302. Acesso em: 27 set. 2026.

PRAUSNITZ, J. M.; LICHTENTHALER, R. N.; AZEVEDO, E. G. Molecular thermodynamics of fluid-phase equilibria. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.

RICHEY, R. C.; KLEIN, J. D. Design and development research: methods, strategies, and issues. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 2007.

SHULMAN, L. S. Those who understand: knowledge growth in teaching. Educational Researcher, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 4–14, 1986. DOI: 10.3102/0013189X015002004. Disponível em: https://doi.org/10.3102/0013189X015002004. Acesso em: 27 set. 2026.

SILVA JUNIOR, C. N.; SCHMITZ, A. P. de O.; ZUBER, A. Visualização assistida por NotebookLM na construção de materiais didáticos para o ensino interdisciplinar de conservação da espécie química e difusão de massa. In: WEB ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA QUÍMICA, 5., 2026, on-line. Anais [...]. Diamantina: Even3, 2026. Disponível em: https://www.even3.com.br/anais/wendeq2026-721857/1653809-visualizacao-assistida-por-notebooklm-na-construcao-de-materiais-didaticos-para-o-ensino-interdisciplinar-de-con/. Acesso em: 27 set. 2026.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M.; SWIHART, M. T. Introduction to chemical engineering thermodynamics. 8. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.

SWELLER, J. Cognitive load during problem solving: effects on learning. Cognitive Science, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 257–285, 1988. DOI: 10.1207/s15516709cog1202_4. Disponível em: https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4. Acesso em: 27 set. 2026.

VOREL, T.; SHAFQAT, U. B. 8 ways to make the most out of Slide Decks in NotebookLM. The Keyword, [s. l.]: Google, 16 dez. 2025. Disponível em: https://blog.google/innovation-and-ai/models-and-research/google-labs/8-ways-to-make-the-most-out-of-slide-decks-in-notebooklm/. Acesso em: 27 set. 2026.

Capítulo 22

10.37423/260911444

UTILIZAÇÃO DE OBJETOS DE APRENDIZAGEM NO ENSINO DA MANUFATURA ADITIVA NA ERA DA INDÚSTRIA 4.0

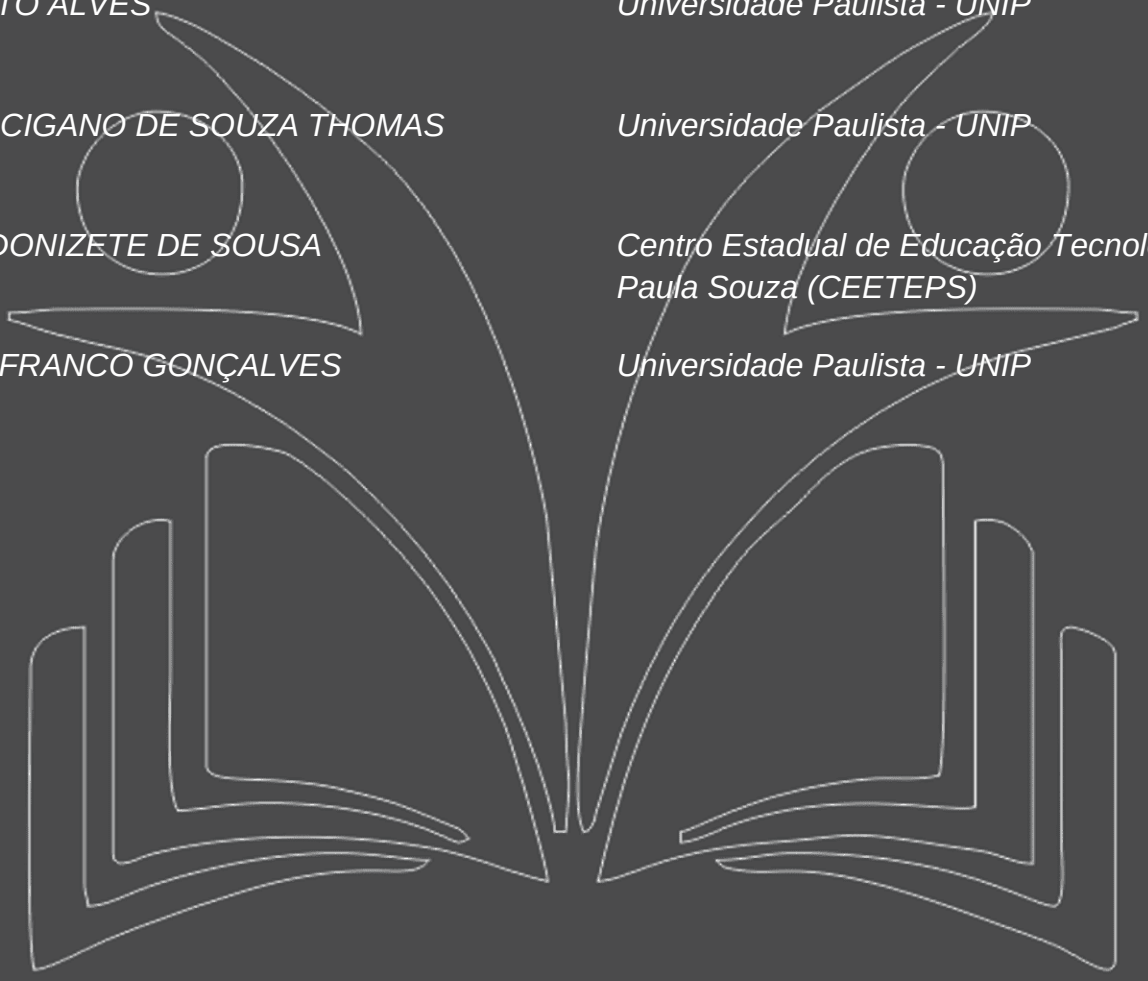
DAVI DE ALBUQUERQUE GOMES — *Universidade Paulista - UNIP*

JOEL PORTO ALVES — *Universidade Paulista - UNIP*

LEANDRO CIGANO DE SOUZA THOMAS — *Universidade Paulista - UNIP*

MARCOS DONIZETE DE SOUSA — *Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza (CEETEPS)*

RODRIGO FRANCO GONÇALVES — *Universidade Paulista - UNIP*



RESUMO

Alimentada por demandas de mercados globais e de consumidores ainda mais críticos, a indústria 4.0 está introduzindo mudanças significativas nos modelos de produção industrial e de serviços, ao integrar tecnologias disruptivas, como a internet das coisas (iot), inteligência artificial (ia), big data e automação. Analisando a questão, a manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3d, emerge como uma ferramenta poderosa para promover a inovação, flexibilidade e eficiência nos processos de fabricação. Utilizando uma metodologia de revisão sistemática e bibliométrica foi identificada que a impressão 3d é objeto central nos estudos analisados, mas que existe escassez de literatura sobre as metodologias ativas, como os objetos de aprendizagem, componentes instrucionais que podem ser reusados para apoiar a aprendizagem interativa e que podem facilitar o desenvolvimento de habilidades específicas dos profissionais de engenharia de produção. Este artigo destaca o papel dos objetos de aprendizagem no ensino aprendizagem da manufatura aditiva na era da indústria 4.0, destacando suas aplicações, benefícios e desafios aplicados ao ensino de engenheiros de produção.

PALAVRAS-CHAVE: objetos de aprendizagem; manufatura aditiva; engenharia de produção; indústria 4.0.

1 INTRODUÇÃO

A manufatura como um todo vivencia uma nova era desde o advento da Indústria 4.0. De acordo com Bonilla et al (2018), a Indústria 4.0 emerge da combinação da disponibilidade de tecnologia digital avançada com a crescente demanda dos consumidores por produtos personalizados e de alta qualidade, caracterizada pela digitalização, automação e interconexão de sistemas. Tecnologias como IoT, IA e Big Data estão impulsionando a criação de fábricas inteligentes e sistemas de produção altamente eficientes. Segundo Zhong, Xu, Klotz e Newman (2017), a Indústria 4.0 pode aumentar a flexibilidade das indústrias, a customização em massa, aprimorar a qualidade e a produtividade, melhor qualidade e diminuir o tempo de comercialização. Neste cenário, a Impressão 3D surge como uma tecnologia que redefini os processos de fabricação, o que a torna indispensável na formação de engenharia de produção.

Paralelamente a criação de tecnologias inovadoras e sua implementação nas escolas ao redor do mundo tem gerado diversas transformações nas abordagens e nos formatos educacionais (PALOS-SANCHEZ, 2024). Dentro desse cenário os Objetos de Aprendizagem (OA), descrito por Audino e Nascimento (2010), como qualquer recurso digital que possa ser reaproveitado para auxiliar no processo de ensino, tem transformado a educação industrial oferecendo recursos digitais interativos que facilitam o aprendizado e o desenvolvimento de habilidades dos profissionais de engenharia. Para Blanc (2012), esta inovação está centrada na produção de objetos de aprendizagem pelos próprios alunos, utilizando uma metodologia ativa para incentivar o autoestudo e melhorar a assimilação do conhecimento.

O presente artigo tem como objetivo identificar como OA podem ser utilizados para o ensino de impressão 3D no contexto da formação de profissionais para Indústria 4.0. Para tal, realiza-se uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para responder à questão específica de pesquisa: "Como os objetos de aprendizagem têm sido utilizados para facilitar o ensino e aprendizagem de impressão 3D para engenheiros de produção no contexto da Indústria 4.0?" Está estruturado da seguinte forma: após a introdução, uma seção de Revisão da Literatura, descrevendo os conceitos da Indústria 4.0, da Manufatura Aditiva ou Impressão 3D, e dos Objetos de Aprendizagem, a terceira seção descreve a aplicação da metodologia de Revisão Sistemática da Literatura e a análise textual gerada por meio do Software VOSviewer versão 1.6.19, os resultados identificados a partir das análises, discutidos com base na aplicação da metodologia e na seção 4 são apresentadas as principais conclusões atingidas.

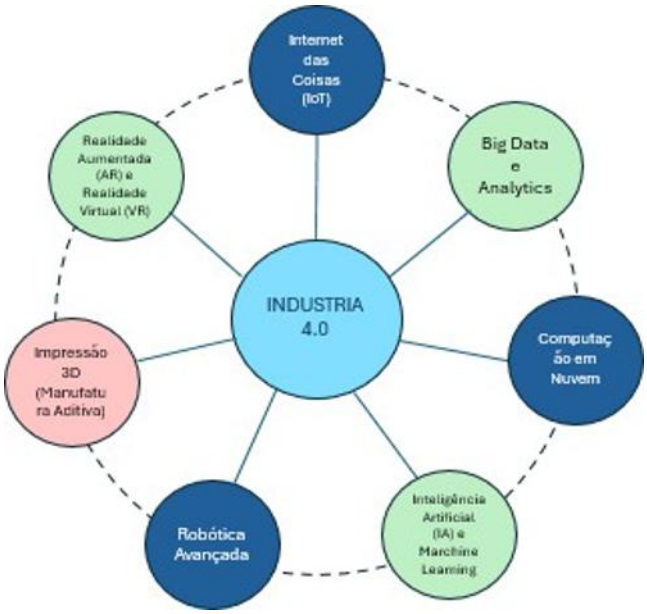
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A necessidade de atender mercados globais cada vez mais competitivos e consumidores mais informados e mais exigentes causaram transformações inovadoras e potenciais oportunidades nas áreas industriais, tecnológicas e na educação (LATILLA, 2021).

2.1 O Impacto transformador da indústria 4.0: uma perspectiva tecnológica

A Indústria 4.0 inicia uma era que está redefinindo os paradigmas de produção e gestão em diversas áreas econômicas, associando tecnologias, tais como: Inteligência artificial, Computação em nuvem, Big Data, Cybersegurança, Internet das coisas, Robótica avançada, Manufatura digital, Manufatura aditiva, Integração de sistemas, Sistemas de simulação e Digitalização, conforme demonstra a Figura 1, convergindo para criar sistemas produtivos altamente eficientes e adaptáveis (DA SILVA, 2022).

FIGURA 1- Algumas das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0.



Fonte: Autores (2024).

Para Klaus Schwab, a Indústria 4.0 configura "uma revolução tecnológica que modificará substancialmente a forma como vivemos, trabalhamos e nos relacionamos" diz Schwab (2016), demonstrando não só uma mudança tecnológica, mas também a expectativa de uma intensa mudança cultural, econômica e social em andamento. Segundo a consultoria McKinsey, Hagemann (2018), a implementação dessas tecnologias pode gerar ganhos de produtividade de até 30% em diversos setores industriais nos próximos anos e se acredita que responda pela geração de novos negócios e empregos, inovação em escala global e estímulo ao crescimento econômico.

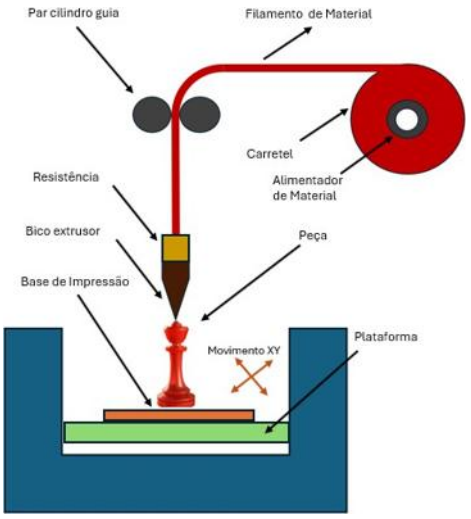
Todavia para a implementação de sucesso das tecnologias da Indústria 4.0 é fundamental trabalhadores altamente qualificados, Vilalta-Perdomo (2022), e essa transformação traz desafios, como a exigência de que os trabalhadores das áreas envolvidas pela automatização desenvolvam competências que atendam aos requisitos impostos pelas seções produtivas para acompanharem os avanços tecnológicos (DA SILVA, 2022).

Sobre a manufatura aditiva Inácio (2020) chama a atenção para o potencial de desenvolvimento e fabricação de ferramentas mais rápido, mais eficaz e mais flexível, ressaltando a relevância desta tecnologia nesta nova era associada à Indústria 4.0.

2.2 A impressão 3d na indústria 4.0: uma força transformadora

Na era da Indústria 4.0 diversos setores industriais têm seus produtos projetados e produzidos através da tecnologia de Impressão 3D, também conhecida como Manufatura Aditiva (AM), processo originalmente produzido usando um sistema 3D Computer-Aided Design (CAD) é descrita por Wibawa (2021) como uma montagem de materiais para criar objetos ou estruturas a partir de modelos tridimensionais, geralmente camada por camada, em oposição aos métodos tradicionais de produção com redução, conforme detalhado na Figura 2:

FIGURA 2 – Diagrama do processo de impressão 3D.



Fonte: Autores (2024).

Os modelos tridimensionais criados por impressão 3D reduzem o tempo de design e desenvolvimento, aumentar a colaboração entre várias partes, e resolvem problemas que surgem entre o mundo da engenharia e do design, Jordan (2018 apud Wibawa, 2021), oferecendo, assim, vantagens para diversas

áreas da indústria em termos de prototipagem rápida, redução de custos, customização e tempo de desenvolvimento de produtos.

Numa era digitalizada é essencial para profissionais de engenharia de produção, estarem atentos as necessidades da indústria moderna, Novak (2018 apud Wibawa, 2021), destaca o potencial, da Impressão 3D, para a aplicação da ciência conhecimento em sala de aula e envolvimento em práticas de engenharia". Proporciona aos alunos a oportunidade de explorar a relação entre engenharia, tecnologia e aplicação de conceitos científicos, e funcionam como estratégias de ensino inovadoras e eficazes na apresentação de conceitos de engenharia, melhorando a sua atitude conclusiva em relação ao ensino de ciências (HORVATH, 2018 apud WIBAWA, 2021).

Assim sendo, Chen, Chang (2018), esclarece que inovações tecnológicas, explorando soluções que utilizam materiais misturados, prometem custos mais baixos, maior resistência e designs mais limpos, aprimoramento de processos de fabricação pode ser aplicados por profissionais de engenheiro de produção que compreenderem esses princípios. E os alunos de programas de engenharia que já aprenderam CAD têm um bom começo.

2.3 Objetos de aprendizagem: ampliando o potencial da indústria 4.0

A introdução da Industria 4.0 nos processos produtivos, afirma Gorkhali (2022), se depara com o paradigma de integrar o operador humano no sistema industrial, ampliando suas habilidades e proporcionando um ambiente de trabalho colaborativo, redefinindo a interfaces homem-máquina. Os Objetos de aprendizagem são, segundo Blanc (2012), recursos digitais geralmente criados por instrutores ou especialistas como ferramentas de apoio ao ensino e devem estar alinhados com os objetivos educacionais. Também conhecida como Objetos de Conteúdo, Objetos Educacionais, Objetos de Informação, Objetos de Inteligência, Componentes de Aprendizagem e Objetos de Mídia fornecem experiências interativas para um aprendizado personalizado (ARTHA, 2021).

Sobre OAs, Balacheff (2000 apud Rosito, 2020) afirma a "necessidade de construções e de transformações para que os recursos presentes nos processos industriais possam ser considerados objetos de aprendizagem", assim a Impressão 3D, umas das tecnologias facilitadoras da Industria 4.0, foi introduzida no ensino como importante estratégia para o aprendizado de conceitos complexos de fabricação e designer.

O professor de Psicologia e Tecnologia da Informação na Universidade Brigham Young David Wiley (2000) define Objetos de Aprendizagem com "[...] são recursos digitais que podem ser reutilizados para apoiar a aprendizagem". Os OAs permitem que profissionais de engenharia de produção vivenciem conceitos baseado em conteúdo educacional, tanto práticos como teóricos, de forma acessível e interativa. Também, existe uma compreensão mais profunda com todas as vantagens da tecnologia de impressão 3D gerando uma aprendizagem mais significativa da concepção, criação, experimentação e exploração de ferramentas tecnológicas, permitindo o desenvolvimento da fabricação aditiva, com instrumentos que incentivam a experimentação (CHEN, CHANG, 2018).

A pesquisa dirigida por Yang, Chen e Chen (2018) revelou que a utilização de Objetos de Aprendizagens no aprendizado de Impressão 3D demonstrou-se positivo na satisfação com o processo de aprendizagem e desempenho dos estudantes. E segundo relatos dos pesquisados, o desenvolvimento das habilidades práticas mostrou-se de forma mais eficaz que as metodologias de ensino tradicionais e auxiliou na consolidação dos conceitos teóricos.

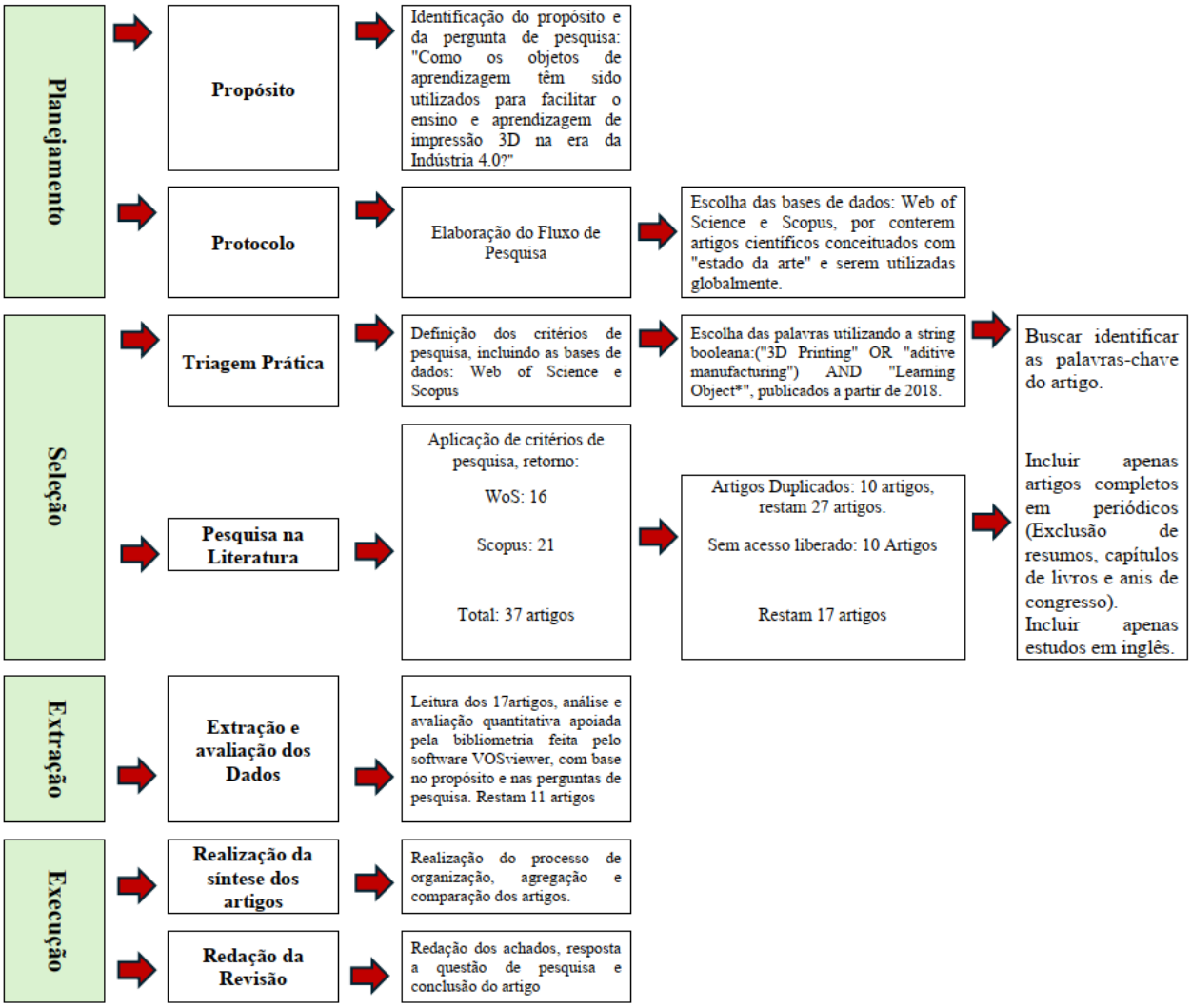
3 MÉTODO

No presente artigo, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), que seguiu um protocolo estruturado para identificar estudos relevantes nas bases de dados Scopus e Web of Science com a string de busca "3D Printing AND Industry 4.0 AND Learning Objects", Article Title, Abstract e Keywords. Em seguida, uma análise bibliométrica foi conduzida utilizando o software VOSviewer, permitindo explorar visualmente as relações entre os conceitos na Indústria 4.0, Impressão 3D e Objetos de Aprendizados.

3.1 Revisão sistemática da literatura (RSL)

Este estudo fundamentou-se por uma (RSL) que tem o objetivo de examinar como os objetos de aprendizagem podem facilitar a instrução e assimilação da manufatura aditiva nos cursos de engenharia, com ênfase nos engenheiros de produção, no contexto da Indústria 4.0. Para tanto adotou-se o protocolo baseado nas diretrizes estabelecidas por Okoli (2015), adaptado para contexto específico. Conforme Okoli (2015) e Petticrew & Roberts (2008) o protocolo da RSL seguiu as quatro etapas distintas, iniciando pela seleção inicial dos estudos com base nos critérios de inclusão e exclusão estabelecidos, conforme a Figura 3:

FIGURA 3 – Relação dos artigos selecionados na Revisão Sistemática de Literatura.



Fonte: Autores (2024).

Logo após seguisse os para a análise detalhada dos estudos selecionados, extraindo informações relevantes sobre o uso de objetos de aprendizagem no contexto da Impressão 3D e Indústria 4.0. Na continuação, os resultados obtidos foram sintetizados, identificando padrões, tendências e lacunas na literatura existente.

Posteriormente, elaborou-se uma discussão crítica dos achados, destacando as contribuições dos estudos revisados. O uso do protocolo forneceu uma visão abrangente e atualizada sobre o uso de Objetos de Aprendizagem no ensino da Impressão 3D na era da Indústria 4.0, contribuindo assim para o avanço do conhecimento nesse campo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A triagem prática e a pesquisa na literatura resultaram na seleção de 11 artigos científicos significativos por apresentarem relação direta com os termos pesquisados ("3D Printing AND Industry 4.0 AND Learning Objects"), os quais são listados na Tabela 1:

TABELA 1 – Relação dos artigos selecionados na revisão sistemática de literatura.

	Autores	Título	Ano	Tema/Foco
	Chebil G.; Bettebghor D.; Renollet Y.; Lapouge P.; Davoine C.; Thomas M.; Favier V.; Schneider M.	Deep learning object detection for optical monitoring of spatters in L-PBF	**2023**	O texto se concentra na análise do processo de fusão a laser com leito de pó (L-PBF) na manufatura aditiva de materiais metálicos, com destaque para o fenômeno de projeção de partículas metálicas, conhecidas como "spatters". O tema central é a introdução do sistema global inovador chamado SP(AM)² (Método de Análise de Spatters para Manufatura Aditiva), que integra estudos experimentais in situ com monitoramento por câmera e uso de aprendizado profundo para controle automatizado do processo de manufatura aditiva. Este sistema permite a detecção e análise detalhada das características dos spatters, fornecendo informações para otimizar os parâmetros do processo e estratégias de digitalização, visando minimizar defeitos relacionados aos spatters.
	Funes-Lora M.A.; Fu A.Q.; Webster N.; Burcon S.; Shih A.J.	A Common First-Year Undergraduate Engineering Course in Manufacturing based on Industrial Robots and Flipped Classroom	**2022**	O texto descreve um curso de engenharia de primeiro ano chamado "Manufatura e Sociedade", que integra engenharia, ciências sociais e comunicação técnica para oferecer aos alunos uma compreensão completa da manufatura, com foco em robôs industriais. Utilizando a abordagem da sala de aula invertida, enfatiza a aplicação prática de conhecimentos em CAD, fabricação aditiva, programação de robôs e análise dos impactos sociais da pintura robótica. Destaca-se a importância das palestras de ciências sociais para orientar decisões de design e fabricação, além de entender as implicações sociais e futuras tendências do trabalho na indústria manufatureira. O texto também avalia a eficácia da abordagem da sala de aula invertida durante a pandemia de COVID-19 e sugere sua continuidade no pós-pandemia, ressaltando os benefícios da interação mais próxima entre alunos e instrutores, além da redução de erros técnicos por meio de ferramentas de simulação.
	Howell M.E.; Booth C.S.; Sikich S.M.; Helikar T.; Roston R.L.; Couch B.A.; van Dijk K.	Student Understanding of DNA Structure–Function Relationships Improves from Using 3D Learning Modules with Dynamic 3D	**2019**	O foco do texto é a apresentação e avaliação de três módulos de aprendizagem interativa desenvolvidos para auxiliar estudantes de bioquímica na visualização de estruturas biomoleculares e na compreensão das relações entre estrutura e função molecular. O tema central é a utilização de modelos tridimensionais (3D) impressos em impressoras 3D como uma ferramenta eficaz e acessível para promover a compreensão desses conceitos, abordando objetivos

		Printed Models		específicos de aprendizagem relacionados à estrutura de DNA e RNA, interações fator de transcrição-DNA e dinâmica de superenrolamento de DNA. O texto destaca os resultados positivos obtidos com a implementação desses módulos, demonstrando um aumento significativo na capacidade dos alunos de relacionar estruturas moleculares a funções bioquímicas. Além disso, fornece recursos e orientações para instrutores interessados em incorporar esses módulos em suas salas de aula.
	Luna A.; Talavera A.; Chong M.	How to motivate the interest in physics to engineering students without dying in the attempt?	**2018**	O texto descreve uma abordagem pedagógica inovadora para engajar e motivar os alunos, especialmente da Geração Z, em cursos de ciências básicas, com foco na física. Destaca a adoção de metodologias educacionais como Sala de Aula Invertida, Aprendizagem Baseada em Projetos, Aprendizagem Cooperativa e Design Thinking para promover uma participação ativa dos alunos na construção do conhecimento e no desenvolvimento de habilidades. Também enfatiza a importância de incorporar temas contemporâneos, como impressão 3D, eletrônica, robótica e IoT, para aumentar a relevância e o interesse dos estudantes, preparando-os para os desafios da 4ª Revolução Industrial. Além disso, apresenta uma análise detalhada dos resultados obtidos com a implementação dessas estratégias, evidenciando seu impacto positivo no desempenho dos alunos e na demonstração de conhecimento ao longo do processo educacional.
	Antoniou P.; Sidiropoulos E.; Stathakarou N.; Chatzimallis C.; Chondrokostas E.; Sumunar D.; Karlsson T.; Lachanoudi S.; David P.; Tagaras K.; Varella A.; Athanasiou A.; Pickering J.; Tooulias A.; Karolos I.; Filippidis P.-M.; Schiza E.; Voulgarakis V.; Bratsas C.; Tsioukas V.;	Streamlining Tangible 3D Printed and Intangible XR Content Creation and Evaluation: The ENTICE Experience	**2023**	O texto apresenta os resultados preliminares do projeto ENTICE, que busca desenvolver um pipeline sólido de criação de conteúdo experiencial médico por meio de metodologias de co-criação. O foco está no desenvolvimento e avaliação de recursos e ferramentas imersivas de aprendizagem, como AR/VR/MR e impressão 3D, para apoiar objetivos de aprendizagem específicos em anatomia e cirurgia. São destacados os resultados da avaliação desses recursos em três países, juntamente com lições aprendidas para aprimorar a educação médica.

	Tsoulfas G.; Bamidis P			
6	Renna J.M.; Sondereker K.B.; Cors C.L.; Chaszeyka S.N.; Keenan K.N.; Corigliano M.R.; Milgrom L.A.; Onyak J.R.; Hamad E.J.; Stabio M.E.	From 2D slices to a 3D model: Training students in digital microanatomy analysis techniques through a 3D printed neuron project	**2024**	O texto descreve uma atividade de aprendizagem inovadora que ensina os alunos a criar modelos anatômicos digitais tridimensionais (3D) de neurônios a partir de imagens em 2D, visando suprir a falta de habilidades técnicas para reconstruir modelos anatômicos em 3D. Destaca a importância dessa atividade para a compreensão da neuroanatomia e para o desenvolvimento de habilidades técnicas de pesquisa em análise de imagem. Apresenta recursos instrucionais e objetivos de aprendizagem alinhados com a Taxonomia de Bloom, promovendo o engajamento dos alunos em todos os níveis. Demonstrando um fluxo de trabalho acessível e adaptável, busca ampliar o uso da impressão 3D na educação em microanatomia e neuroanatomia.
7	Ghatwary N.; Abouzeina A.; Kantoush A.; Eltawil B.; Ramadan M.; Yasser M.	Intelligent Assistance System for Visually Impaired/Blind People (ISVB)	**2022**	O texto descreve um projeto para desenvolver um sistema automatizado de assistência para pessoas com deficiência visual, chamado Sistema de Assistência Inteligente para Pessoas com Deficiência Visual (ISVB). O ISVB é composto por um boné inteligente, uma bengala inteligente impressa em 3D e um aplicativo móvel que se conecta ao sistema por meio de um servidor online. O boné inteligente possui uma câmera e um módulo de detecção de objetos por aprendizado profundo, enquanto a bengala inteligente utiliza sensores e um módulo Bluetooth para analisar o ambiente. O aplicativo móvel interage com o boné e a bengala, fornecendo navegação virtual para auxiliar pessoas com deficiência visual em seus deslocamentos. O desempenho do sistema é avaliado por meio de experimentos, alcançando uma eficiência geral de 94,6%. O texto destaca a importância dessas tecnologias para melhorar a mobilidade e segurança dos deficientes visuais.
8	Crowe C.D.; Hendrickson-Stives A.K.; Kuhn S.L.; Jackson J.B.; Keating C.D.	Designing and 3D Printing an Improved Method of Measuring Contact Angle in the Middle School Classroom)	**2021**	O texto apresenta um método acessível e prático para medir o ângulo de contato da água em diversas superfícies, utilizando uma configuração impressa em 3D e dispositivos inteligentes, como celulares ou tablets, para captura de imagens. O tema central é tornar os conceitos científicos relevantes e acessíveis para estudantes do ensino fundamental ao médio, por meio de métodos experimentais simples e de baixo custo. Embora equipamentos caros sejam utilizados em laboratórios para esse fim, é possível desenvolver uma configuração mais acessível para uso em salas de aula, proporcionando uma

				experiência de aprendizagem prática e eficaz. O método foi bem-sucedido para ensinar sobre as interações entre água e superfície em diferentes materiais e substratos.
9	Chen Y.-H.; Chang P.-L.	3D printing assisted in art education: Study on the effectiveness of visually impaired students in space learning	**2018**	O texto explora o uso da impressão 3D na educação artística de pessoas com deficiência visual. Destaca-se a dificuldade dessas pessoas em apreciar obras de arte devido à falta de visão e como a tecnologia de impressão 3D pode proporcionar uma experiência tátil para permitir a apreciação artística através do tato. O estudo visa reproduzir obras de arte em formato 3D e em relevo para que os alunos com deficiência visual reconheçam os objetos e compreendam a composição das pinturas, além de introduzir o conceito de aprendizagem espacial utilizando a impressão 3D como material de ensino. Essas abordagens são importantes para motivar e facilitar a aprendizagem de alunos com deficiência visual na área da arte.
10	Wollmuth E.M .; Correa A.; Obando M.A.; Smith M.K.; Buckley D.H .; Hefferon K.L.; Angert E.R.	Helping students see bacteria in 3D: cellular models Increase student learning about cell size and diffusion	**2023**	O texto aborda o uso de modelos tridimensionais (3D) de células bacterianas como ferramentas de ensino na sala de aula de biologia. O tema principal é a importância da visualização e compreensão da relação espacial entre células e macromoléculas, especialmente em relação ao tamanho celular e sua influência na fisiologia microbiana. Uma lição é descrita, na qual modelos 3D de células são utilizados para ensinar alunos em um curso introdutório de microbiologia sobre o tamanho celular bacteriano e a importância biológica da relação área de superfície-volume. Os alunos interagem com os modelos durante a lição e participam de discussões em grupos pequenos. A avaliação da aprendizagem dos alunos revelou uma melhora na compreensão do tamanho celular bacteriano e da difusão após a interação com os modelos 3D.
11	Kocyigit, A; Yuksel, E; Yuksel, O	Assessing the Effectiveness of 3D-Printed Testes and Ovary Biomodels in Veterinary Reproduction Education: Student - Centered Approach	**2023**	O texto investiga a eficácia de biomodelos tridimensionais (3D) impressos de testículos e ovários na educação veterinária em reprodução, além de examinar a perspectiva dos estudantes sobre esses recursos. Destaca-se a utilização desses biomodelos como alternativa aos materiais tradicionais de ensino, como animais vivos e cadáveres, devido a preocupações éticas, culturais e de segurança. O texto ressalta a importância do entendimento da morfologia dos tecidos testiculares e ovarianos para os veterinários e relata os resultados de um estudo que comparou a eficácia dos biomodelos com materiais de abatedouro, concluindo que os estudantes preferiram os biomodelos para o treinamento prático e expressaram interesse em utilizá-los em outros campos da educação em medicina veterinária.

Fonte: Autores (2024).

Como resultado, foi possível observar e quantificar que 11 artigos abordam o tema central da utilização de tecnologias e metodologias inovadoras no processo de ensino-aprendizagem em múltiplas áreas do conhecimento:

Sendo 8 dos 11 artigos enfatizam a utilização da impressão 3D como ferramenta para aprimorar a compreensão em áreas como microbiologia, bioquímica, neuroanatomia, arte para pessoas com deficiência visual, engenharia e educação veterinária. Um total de 6 artigos relatam estudos de caso e resultados de avaliações para comprovar a eficácia das abordagens educacionais implementadas, destacando a melhoria no desempenho e entendimento dos alunos. A 4 artigos que demonstram a incorporação de tecnologias como Robótica, IoT, Realidade Aumentada/Virtual/Mista (AR/VR/MR) e Sistemas Inteligentes para melhorar a aprendizagem em engenharia, ciências básicas, medicina e assistência a deficientes visuais.

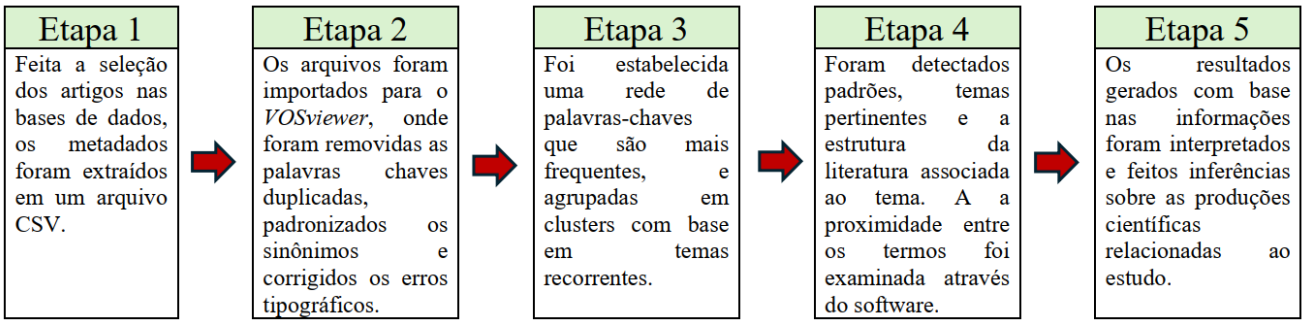
Também são 4 artigos que mencionam a sala de Aula Invertida e a Aprendizagem Baseada em Projetos, destacando a relevância de abordagens que incentivem a participação ativa dos alunos e a construção colaborativa do conhecimento. Já 3 artigos salientam a importância de tornar a educação acessível e pertinente para grupos específicos, como alunos com Deficiência Visual e a Geração Z. Para 2 artigos o destaque está na integração de diferentes disciplinas, como Engenharia e Ciências Sociais, e a combinação de Aprendizagem Prática e Compreensão Teórica.

Os artigos apresentam uma visão abrangente de como tecnologias modernas, metodologias inovadoras e uma abordagem interdisciplinar podem transformar a educação, tornando-a mais eficaz, acessível e envolvente para diferentes grupos de alunos e disciplinas.

4.1 Análise bibliométrica

Foi conduzido um estudo bibliométrico que empregou palavras-chave como base, sendo possível explorar visualmente as relações entre os conceitos. A análise envolveu cinco etapas distintas que estão descritas na Figura 4, a qual detalha cada uma das etapas:

FIGURA 4 – Estrutura da pesquisa.



Fonte: Autores (2024).

A revisão bibliográfica identificou 11 artigos científicos válidos, que foram sintetizados no Tabela 2 fica exposto em ordem lógica as principais publicações e os termos recorrentes, permitindo assim compreender o panorama em torno da string de busca proposta, como vemos apresentados ordenadamente a seguir:

TABELA 2 – Relação dos temas principais e suas aplicações.

	Termos	Principais ocorrências dos termos na pesquisa	Autores
1	**Deep Learning**	"estratégia é envolver os alunos em seu processo de aprendizagem com novas metodologias educacionais, enfrentar diferentes projetos e incentivar novos desafios no processo de ensino-aprendizagem. O objetivo de aprendizagem é integrar os alunos em uma participação ativa para construir seu conhecimento e desenvolver suas habilidades."	Ana Luna, Álvaro Talavera, Mario Chong
		"O objetivo principal deste projeto foi criar uma atividade de aprendizado simples e econômica que envolvesse os alunos no processo de criação de modelos digitais 3D a partir de conjuntos de dados anatômicos 2D na escala da microanatomia. Um neurônio, que é uma estrutura morfológica 3D complexa, foi usado como a estrutura de exemplo para a atividade de aprendizado baseada em vídeo que guiou os alunos através das etapas de análise de imagem e modelagem 3D. "	Jordan M. Renna, Katelyn B. Sondereker, Christopher L. Cors, Sara N. Chaszeyka, Kristin N. Keenan| Michael R. Corigliano, Lindsey A. Milgrom, Jessica R. Onyak, Edward J. Hamad, Maureen E. Stabio (2023)
2	**Learning Systems**	"este estudo toma a educação artística ...como exemplo para observar e avaliar a eficácia da aprendizagem de alunos com deficiência visual através do ensino experimental em uma aula de obra de arte impressa em 3D."	Yang-Hui Chen, Pai-Ling Chang
		"A maioria dos estudantes atuais não consegue viver sem a digitalização, pois estão operando em ambientes de tecnologia da informação e comunicação lotados. Dessa forma, existem tipos de aprendizado em diferentes ambientes, tanto online quanto presenciais,	Ana Luna, Álvaro Talavera, Mario Chong

		dentro e fora da sala de aula."	
3	**Curricula**	"Alguns países europeus e americanos produzem sofisticados auxílios de ensino em esculturas impressas em 3D, como a clássica série de relevos famosos, "Strawberry Hill de Londres" impresso em 3D, "material de arte com tecnologia 3D do laboratório de frangos", livros extracurriculares para deficientes visuais e materiais de ensino relevantes que apoiam a "alfabetização em mapas táteis", entre outros."	Yang-Hui Chen, Pai-Ling Chang
4	**Engeneering education**	"Atualmente, os estudantes chegam às universidades com um conhecimento prévio do mundo digital, o que cria o cenário favorável para o início da aprendizagem que permite aos futuros profissionais e trabalhadores imergirem no mundo real do trabalho que está sendo criado."	Ana Luna, Álvaro Talavera, Mario Chong
5	**Students**	"Esse ambiente dá origem à criação de laboratórios tecnológicos para uma formação sólida dos estudantes, além de contribuir para o desenvolvimento de estratégias inovadoras de aprendizado, treinamento e geração de conhecimento no campo das competências, também estimulando o trabalho colaborativo."	Ana Luna, Álvaro Talavera, Mario Chong
		"Ao envolver os alunos na produção de um modelo digital 3D, esta atividade de aprendizado é projetada para fornecer aos alunos uma maneira nova de aprimorar sua compreensão do conteúdo, incluindo o conhecimento didático da morfologia do neurônio, habilidades técnicas de pesquisa em análise de imagem e exploração de carreira na pesquisa de neuroanatomia.	Jordan M. Renna, Katelyn B. Sondereker, Christopher L. Cors, Sara N. Chaszeyka, Kristin N. Keenan| Michael R. Corigliano, Lindsey A. Milgrom, Jessica R. Onyak, Edward J. Hamad, Maureen E. Stabio (2023)
		"Um conceito biológico fundamental com o qual os estudantes têm dificuldade é a relação entre a estrutura do DNA e suas funções. Por exemplo, os alunos têm concepções errôneas sobre a maneira como as bases de DNA são empilhadas e acessíveis às proteínas ligantes de DNA, a continuidade e as informações apresentadas nas ranhuras do DNA, a flexibilidade e a natureza dinâmica das moléculas de DNA, e as enzimas que clivam e reparam o DNA [9-12]."	Michelle E. Howell, Christine S. Booth, Sharmin M. Sikich, Tomáš Helikar† Rebecca L., Roston Brian A. Couch, Karin van Dijk. (2019)
6	**3D Printers**	"os estudantes universitários, atualmente, estão imersos na 4ª Revolução Industrial; portanto, como educadores, focamos em impressoras 3D, eletrônica, robótica e IoT. Por esse motivo, nossa estratégia é envolver os alunos em seu processo de aprendizado com novas metodologias educacionais, enfrentar diferentes projetos e incentivar novos desafios no processo de ensino-aprendizagem. O objetivo de aprendizagem é integrar os alunos em uma participação ativa para construir seu conhecimento e desenvolver	Ana Luna, Álvaro Talavera, Mario Chong

		suas habilidades.	
		"Todos os modelos estão disponíveis como arquivos estruturais que podem ser adaptados a muitas impressoras 3D (Arquivo de Informações de Suporte S7) ou como modelos sob demanda através do fornecedor comercial Shapeways (www.shapeways.com/shops/macromolecules). "	Michelle E. Howell, Christine S. Booth, Sharmin M. Sikich, Tomáš Helikar† Rebecca L., Roston Brian A. Couch, Karin van Dijk. (2019)
		"Os modelos para a Parte I e Parte II estão em escalas diferentes devido ao grande tamanho de T. namibiensis e às restrições de tamanho da cama da impressora padrão de 3D, mas dentro de cada conjunto, todos os modelos estão na mesma escala. Os nucleóides são construídos a partir de cerca de 150 metros de linha de pesca e são aproximadamente proporcionais em termos de comprimento cromossômico, mas o filamento de 0,35 mm de largura é aproximadamente 1,75 vezes a largura do DNA em escala."	Emily M. Wollmuth, Alberto Correa III, Manuela Alvarado Obando, Michelle K. Smith, Daniel H. Buckley,1,3 Kathleen L. Hefferon, Esther R. Angert (2023)
		"Muitas faculdades e universidades têm impressoras 3D disponíveis na biblioteca para professores e estudantes usarem gratuitamente. No entanto, a disponibilidade de uma impressora 3D e o custo do filamento são considerações importantes ao implementar esta atividade de aprendizado em outras instituições e podem variar."	Jordan M. Renna, Katelyn B. Sondereker, Christopher L. Cors, Sara N. Chaszeyka, Kristin N. Keenan| Michael R. Corigliano, Lindsey A. Milgrom, Jessica R. Onyak, Edward J. Hamad, Maureen E. Stabio (2023)
7	**Learning Objectives**	"Priorizar objetivos de aprendizagem"	Yang-Hui Chen, Pai-Ling Chang
		"Uma das tendências no processo de educação e treinamento é colocar o aluno como autor e gestor de seu conhecimento, desenvolvendo habilidades a partir de suas ações. Parte desse processo, que busca melhorar a qualidade da aprendizagem, é alcançada pelo uso de certas técnicas, como a participação do aluno em um ambiente lúdico ou na simulação de um problema real."	Ana Luna, Álvaro Talavera, Mario Chong
		"O objetivo do projeto era aumentar a motivação e a confiança dos alunos em várias áreas, incluindo conhecimento didático, habilidades de análise de imagem e impressão 3D de neurônios. Os alunos receberam uma visão geral do projeto no início do curso, e aqueles que o completaram até o final do curso receberam crédito extra equivalente a um questionário semanal, ou uma nota especial em seu relatório de desempenho no curso.	Jordan M. Renna, Katelyn B. Sondereker, Christopher L. Cors, Sara N. Chaszeyka, Kristin N. Keenan| Michael R. Corigliano, Lindsey A. Milgrom, Jessica R. Onyak, Edward J. Hamad, Maureen E. Stabio (2023)
		"utilizar a tecnologia de impressão 3D para transformar a obra de arte plana em apresentação "	Yang-Hui Chen, Pai-Ling Chang

8	**Printing Three-dimensional**	"Compreender a complexa interdependência entre a estrutura e função macromoleculares representa um objetivo central da educação em ciências da vida para graduação, especialmente dentro da bioquímica [1–3]. No entanto, os estudantes de ciências da vida frequentemente têm dificuldade em visualizar e traduzir entre as imagens estáticas bidimensionais (2D) exibidas em livros didáticos e os conceitos tridimensionais dinâmicos (3D) que representam [4–8]."	Michelle E. Howell, Christine S. Booth, Sharmin M. Sikich, Tomáš Helikar† Rebecca L., Roston Brian A. Couch, Karin van Dijk. (2019)
9	**Three Dimensional Printing**	"Os alunos devem ser capazes de comparar e contrastar os efeitos da modificação química de aminoácidos específicos na estrutura tridimensional de uma proteína. Os alunos devem ser capazes de prever os efeitos biológicos e químicos de mutação ou alteração estrutural do ligante na afinidade de ligação e projetar experimentos apropriados para testar suas previsões."	Michelle E. Howell, Christine S. Booth, Sharmin M. Sikich, Tomáš Helikar† Rebecca L., Roston Brian A. Couch, Karin van Dijk. (2019)
10	**3D Printing**	"Com a mudança do currículo, os estudantes enfatizaram que esperavam uma consolidação prática e experimental. Eles também destacaram a incorporação de robótica e impressão 3D, a introdução de programação e a possibilidade de realizar práticas laboratoriais."	Ana Luna, Álvaro Talavera, Mario Chong
		"A recente expansão da tecnologia de impressão 3D acessível pode superar muitas das desvantagens dos modelos físicos tradicionais, ao mesmo tempo em que aprimora suas vantagens."	Jordan M. Renna, Katelyn B. Sondereker, Christopher L. Cors, Sara N. Chaszeyka, Kristin N. Keenan| Michael R. Corigliano, Lindsey A. Milgrom, Jessica R. Onyak, Edward J. Hamad, Maureen E. Stabio (2023)
		"Nos últimos anos, a impressão 3D tem ganhado popularidade e se tornado amplamente disponível nas universidades por meio do desenvolvimento de "Makerspaces" (15). O uso da impressão 3D oferece uma oportunidade de ensino única, permitindo a criação de modelos personalizados, uma estratégia que já foi implementada anteriormente para fornecer aos alunos representações físicas de macromoléculas, enzimas e operons (16–19)."	Emily M. Wollmuth, Alberto Correa III, Manuela Alvarado Obando, Michelle K. Smith, Daniel H. Buckley,1,3 Kathleen L. Hefferon, Esther R. Angert (2023)

Fonte: Autores (2024).

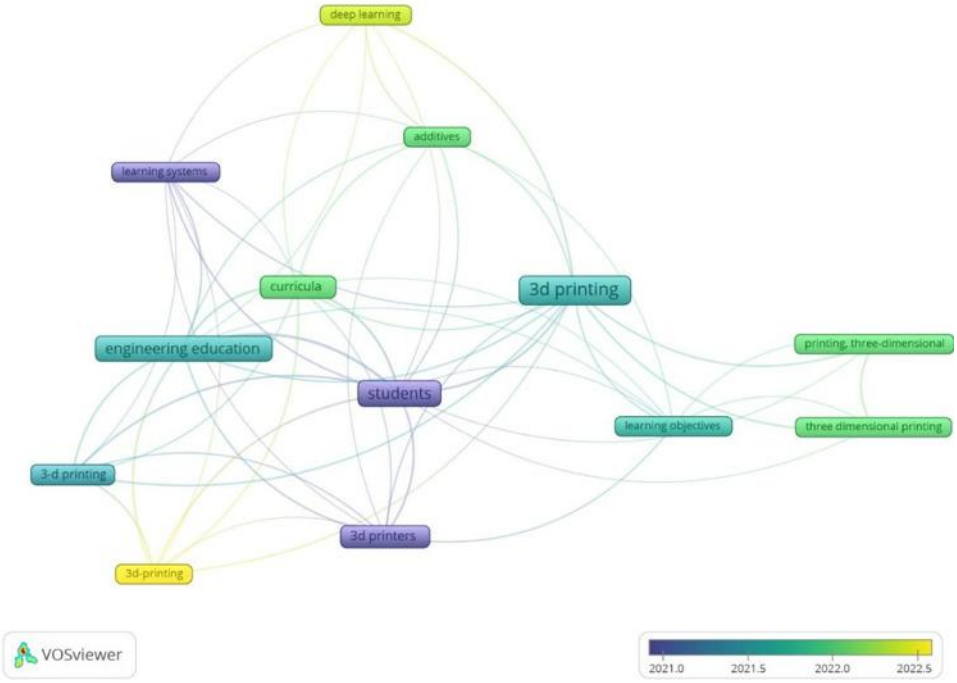
Atravez da análise bibliométrica notou-se a escassez de estudos de caso e exemplos práticos de implementação bem-sucedida de objetos de aprendizagem na Manufatura Aditiva.

Os termos comuns que aparece com maior frequência nos resumos dos artigos pesquisados são: 3D Printers é encontrado em 04 resumos. Os termos 3D Printing e Students aparece nos resumos de 03 autores. São 03 os autores que abordam termos como Learning Objectives, Printing Three-dimensional

e Deep Learning. Já os termos Learning Systems, Curricula, Engeneering education e Three Dimensional Printing está contido em apenas 1 resumo de artigo cada. Sobre a cronologia dos temas, 3D Printing demonstrasse o mais atual, seguido por Curricula, Three Dimensional Printing e Printing Three-dimensional.

A análise bibliométrica com o software VOSviewer permitiu a visualização eficaz das interconexões e padrões emergentes, revelando várias tendências, áreas de interesse e convergência significativa de temas em torno da utilização de tecnologias inovadoras (como as utilizadas pela Industria 4.0) e metodologias ativas (como Objetos de Aprendizagem) no processo de ensino-aprendizagem de Manufatura Aditiva (Impressão 3D) para formação de profissionais de engenharia de produção.

FIGURA 5 – Representação de temas em torno objetos de aprendizagem e impressão 3D.



Fonte: Autores (2024).

A análise também identificou a escassez de estudos de caso e exemplos práticos sobre a implementação bem-sucedida de objetos de aprendizagem na Manufatura Aditiva, o que oferece uma oportunidade para futuras pesquisas abordarem casos reais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente Revisão Sistemática da Literatura e Análise Bibliométrica proporcionaram uma visão abrangente do estado da arte da Objetos de Aprendizagem no ensino aprendizagem da Impressão 3D

na era da Indústria 4.0, demonstrando que a uma forte tendência da integração de tecnologias inovadoras e metodologias ativas no ensino, com uma ênfase significativa no uso de Objetos de Aprendizagem (OAs) como ferramentas essenciais para melhorar a compreensão, o envolvimento e o desempenho dos alunos em diversas áreas do conhecimento.

A impressão 3D, em particular, é repetidamente mencionada como um OA crucial que oferece uma maneira tangível e visual de ensinar conceitos complexos, tornando a educação mais acessível e eficaz. Destaca-se a importância de explorar as interseções entre a Indústria 4.0, a Manufatura Aditiva e os Objetos de Aprendizagem, reconhecendo o papel fundamental que esses elementos desempenham na formação de profissionais de engenharia com destaque para Engenheiros de Produção.

Sugere-se que futuros estudos preencham as lacunas da pesquisa existente, particularmente através da realização de estudos de caso detalhados e exemplos práticos que demonstrem como os OAs estão sendo utilizados com sucesso no ensino da Manufatura Aditiva. Em última análise, esse estudo contribui para o avanço do conhecimento neste campo dinâmico e em constante evolução. Almejamos que nossas descobertas inspirem pesquisas futuras e práticas educacionais que promovam o desenvolvimento de profissionais preparados para os desafios do futuro da manufatura.

REFERÊNCIAS

ARTHA, EMILYA ULLY; WIDIYANTO, ANDI; PRABOWO, NUGROHO AGUNG. The Readiness of Learning Objeto Materials During the COVID-19 Pandemic. CommIT (Communication and Information Technology) Journal, v. 15, n. 1, p. 25-30, 2021.

AUDINO, D. F., & NASCIMENTO, R. S. (2010). Objetos de aprendizagem – diálogos entre conceitos e uma nova proposição aplicada à educação. Revista Contemporânea de Educação, 10(5), pp. 128-148.

BLANC, S. ET AL. Collaborative learning. A project on digital learning object production. In: 2012 International Symposium on Computers in Education (SIIE). IEEE, 2012. p. 1-6.

BONILLA, S. H., SILVA, H. R., TERRA DA SILVA, M., FRANCO GONÇALVES, R., & SACOMANO, J. B. (2018). Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges. Sustainability, 10(10), 3740.

CHEN, YANG-HUI; CHANG, PAI-LING. 3D printing assisted in art education: Study on the effectiveness of visually impaired students in space learning. In: 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI). IEEE, 2018. p. 803-806.

DA SILVA, MARIANA CUNHA ET AL. Job organization requirements as constituent elements of the new work environment within the scope of industry 4.0. Brazilian Journal of Development, v. 8, n. 6, p. 45441-45465, 2022.

GORKHALI, ANJEE. Industry 4.0 and enabling technologies: Integration framework and challenges. Journal of Industrial Integration and Management, v. 7, n. 03, p. 311-348, 2022.

HAGEMANN, BJÖR; OLIVEIRA, RAFAEL. (2018, September). O desafio de produzir mais. Mckinsey Global Institute. https://www.mckinsey.com/br/our-insights/blog-made-in-brazil/o-desafio-de-produzir-mais

INÁCIO, DANILO ET AL. A importância da manufatura aditiva como tecnologia digital para a indústria 4.0: uma revisão sistemática. Revista Competitividade e Sustentabilidade, v. 7, n. 3, p. 653-667, 2020.

LATILLA, VITO MARIA MANFREDI ET AL. Organizational re-design for business model innovation while exploiting digital technologies: A single case study of an energy company. International journal of innovation and technology management, v. 18, n. 02, p. 2040002, 2021.

OKOLI, C. (2015). A Guide to Conducting a Standalone Systematic Literature Review. Communications of the association for information systems, 879 - 810.

ORRILL, C. H. Learning objects to support inquiry-based on-line learning. In: WILEY D. (Ed.). The instructional use of learning objects: on-line version. 2000.

PALOS-SANCHEZ, PEDRO R.; SAURA, JOSE RAMON; VELICIA-MARTIN, FELIX. A case study on a hedonic-motivation system adoption model in a game-based student response system. International Journal of Human–Computer Interaction, v. 40, n. 3, p. 701-718, 2024.

PETTICREW, M., & ROBERTS, H. (2008). Systematic reviews in the social sciences: A practical guide. Malden, MA: Blackwell.

ROSITO, FERNANDO COVOLAN; SOARES, ELIANA MARIA SACRAMENTO; WEBBER, CARINE GELTRUDES. Tecnologias emergentes da indústria 4.0: considerações para o redimensionamento dos currículos de engenharia. Acta Scientiarum. Education, v. 42, 2020.

SCHWAB, KLAUS. "A Quarta Revolução Industrial". Ed. Edipro, 2016.

VILALTA-PERDOMO, ELISEO; MICHEL-VILLARREAL, ROSARIO; THIERRY-AGUILERA, RICARDO. Integrating industry 4.0 in higher education using challenge-based learning: An intervention in operations management. Education Sciences, v. 12, n. 10, p. 663, 2022.

WIBAWA, BASUKI ET AL. Use of 3D printing for learning science and manufacturing technology. In: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2021.

YANG, T.-C., CHEN, Y.-L., & CHEN, N.-S. (2018). The Development of 3D Printing Learning System and Its Effectiveness. Educational Technology & Society, 21(1), 100–113.

ZHONG, R. Y., XU, X., KLOTZ, E., & NEWMAN, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. Engineering, 3(5), 616-630.

Capítulo 23

10.37423/260911446

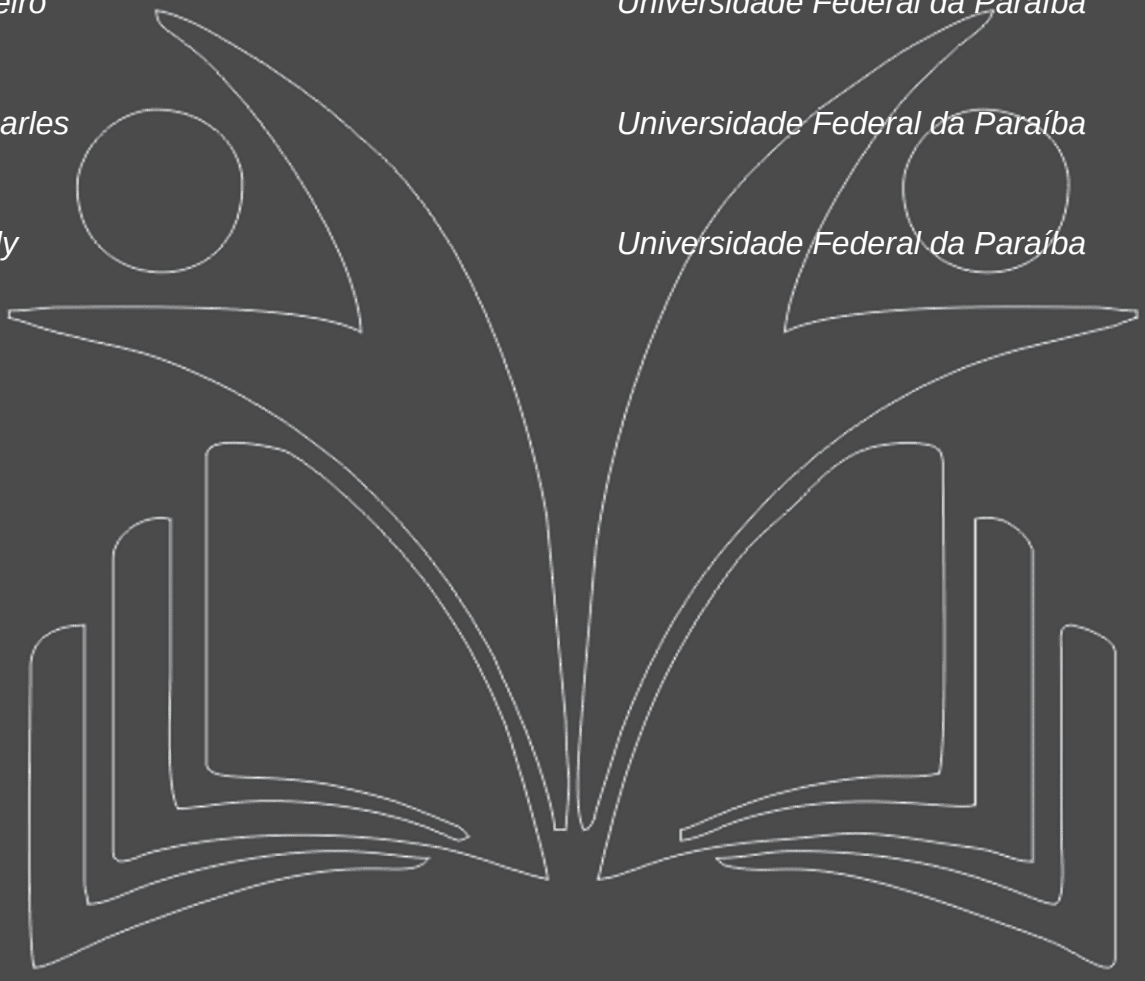
VERTICALIZAÇÃO DE ARMAZENAGEM EM INDÚSTRIA GRÁFICA: IMPACTOS NA EFICIÊNCIA OPERACIONAL

Elisson Charles — *Universidade Federal da Paraíba*

Jailson Ribeiro — *Universidade Federal da Paraíba*

Elinaldo Charles — *Universidade Federal da Paraíba*

Andrea Kelly — *Universidade Federal da Paraíba*



RESUMO

A saturação de espaço e a ineficiência de layouts horizontais em blocagem configuram entraves críticos para a produtividade e a integridade de insumos na indústria gráfica. Este trabalho analisa os impactos operacionais e a viabilidade da verticalização de um armazém gráfico de 864 m², cuja capacidade estática inicial era de 592 posições-palete. Mediante estudo de caso aplicado com levantamento métrico no gemba e modelagem de cenários de movimentação, avaliou-se a implantação de estruturas porta-paletes convencionais combinadas a dois tipos de equipamentos: empilhadeiras a combustão e elétricas. Os resultados indicaram uma expansão da capacidade estática para 786 posições-palete (+33%) no primeiro cenário e para 954 posições-palete (+62%) no segundo, viabilizado pela redução da largura dos corredores operacionais. Constatou-se ainda a elevação da taxa de ocupação de 82,30% para 97,29%, aumento da acuracidade de 79% para 88% e redução no tempo médio de movimentação de 2,5 para 2,0 minutos, eliminando o empilhamento direto e assegurando o princípio FIFO. Conclui-se que a verticalização com empilhadeiras elétricas constitui uma solução logística de alto desempenho para a expansão volumétrica e a integridade de materiais sem a necessidade de ampliação predial.

Palavras-chave: Armazenagem industrial; Estruturas porta-paletes; Verticalização de estoque; Arranjo físico; Logística interna.

1 INTRODUÇÃO

O setor gráfico brasileiro desempenha um papel relevante na cadeia produtiva do país, atendendo diferentes segmentos, como o mercado editorial, a produção de embalagens e os materiais publicitários. Por utilizar grande quantidade de insumos, entre eles papéis, tintas e diferentes tipos de substratos, o gerenciamento adequado dos estoques de matéria-prima e produto acabado torna-se essencial para a eficiência e a competitividade das empresas. Apesar disso, ainda é frequente identificar plantas industriais que operam com layouts horizontais de blocagem direta sobre o piso, reduzindo o aproveitamento cúbico do espaço disponível, dificultando as operações logísticas internas e elevando a incidência de avarias nos materiais estocados.

Pesquisas consolidadas sobre projeto e arranjo de instalações industriais (Gu, Goetschalckx e McGinnis, 2007; Tompkins et al., 2010) ressaltam que a otimização do espaço físico por meio da verticalização seletiva é indispensável para elevar a densidade de estocagem sem comprometer a acessibilidade da carga. Conforme Baker e Canessa (2009), a escolha estruturada de sistemas porta-paletes e a definição geométrica dos corredores operacionais condicionam diretamente o tempo de ciclo de movimentação e os custos operacionais de armazenagem. Adicionalmente, modelos analíticos e matemáticos recentes de despacho e recuperação de paletes (Buckow, Goerigk e Knust, 2025) demonstram que a eliminação de interferências físicas nos corredores resulta em ganhos expressivos na produtividade da frota de movimentação e na fluidez dos fluxos fabris.

Nesse contexto, o problema de pesquisa deste estudo reside na saturação do espaço físico em uma indústria gráfica de grande porte, onde a ausência de verticalização e a blocagem assistemática dos porodutos acabados geram atrasos na localização de materiais, gargalos no fluxo de expedição e perdas por compressão de carga. A questão central que se coloca é: Como a verticalização da armazenagem em uma indústria gráfica pode contribuir para ganhos operacionais, preservação de materiais e otimização do espaço físico, considerando diferentes perfis de equipamentos de movimentação?

O objetivo geral deste trabalho é analisar os impactos operacionais e a capacidade volumétrica decorrentes da implantação de sistemas porta-paletes em uma indústria gráfica, comparando cenários com empilhadeiras a combustão e elétricas. A justificativa fundamenta-se na necessidade prática de racionalizar custos operacionais, assegurar a integridade dos substratos de papel e responder com maior agilidade às demandas de produção, expandindo a capacidade estática da instalação sem exigir investimentos em obras civis de ampliação predial.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A função estratégica da armazenagem na indústria gráfica

O estoque é classicamente conceituado como o acúmulo temporário de matérias-primas, produtos em processo e produtos acabados que sustentam o fluxo produtivo diante das incertezas operacionais (Ballou, 2015; Slack, Brandon-Jones e Johnston, 2018). Na indústria gráfica, a estocagem assume caráter de amortecedor estratégico frente às oscilações na cadeia de suprimentos de celulose e insumos químicos especiais. A gestão eficiente dessa área determina o nível de serviço fabril e preserva as margens financeiras do negócio, uma vez que atrasos e gargalos na intralogística paralisam linhas de impressão e acabamento de alto custo horário.

2.2 Paletização e unitarização de cargas

A paletização compreende o agrupamento e a fixação de volumes individuais sobre uma base padronizada, constituindo uma unidade de carga única para manuseio mecanizado (Moura, 2019). No contexto gráfico, a padronização no formato PBR (1000 mm x 1200 mm) assegura a intercambialidade entre transportadores, fornecedores e estruturas de armazenagem. A unitarização padronizada reduz tempos de manuseio, elimina esforços manuais desnecessários e protege resmas e bobinas contra atritos e deformações mecânicas durante a movimentação interna.

2.3 Sistemas porta-paletes e verticalização

O sistema porta-paletes convencional constitui uma estrutura metálica pesada composta por montantes verticais contraventados e longarinas horizontais ajustáveis, projetada para a sustentação de cargas paletizadas em múltiplos níveis (Banzato, 2020). Sua principal vantagem técnica reside na seletividade de 100%, conferindo acesso visual e operacional imediato a qualquer palete sem exigir a remoção de cargas adjacentes. Essa característica erradica o 'efeito de pilha' típico da blocagem horizontal direta no piso.

Conforme enfatizado por Gu, Goetschalckx e McGinnis (2007) e Tompkins et al. (2010), o projeto de sistemas de armazenagem requer o dimensionamento integrado entre a altura útil da edificação, a capacidade portante do piso e, criticamente, a largura dos corredores de tráfego, a qual é estritamente condicionada pelo raio de giro e especificações da frota de empilhadeiras utilizada.

2.4 Modelos de arranjo físico e eficiência operacional

A literatura clássica de instalações industriais demonstra que ganhos na densidade estática de estocagem geram impactos diretos na cinemática das rotas internas (de Koster, Le-Duc e Roodbergen, 2007). Em layouts em blocagem, a taxa de ocupação nominal é frequentemente penalizada pela necessidade de manter espaço livre para manobras assistemáticas e pela formação de 'falsos vazios' provocados pela retenção de lotes heterogêneos.

A modelagem de cenários de layout com base em parâmetros geométricos rígidos permite balancear a densidade volumétrica com a fluidez do tráfego (Baker e Canessa, 2009). Estudos focados em problemas de roteirização e manuseio de paletes (Buckow, Goerigk e Knust, 2025) reforçam que a minimização do tempo de manobra e a redução do ciclo de viagem das empilhadeiras são funções diretas da padronização dos corredores e do acesso direto às posições.

2.5 Indicadores e métricas de desempenho em armazenagem

A avaliação do desempenho de armazéns industriais assenta-se em métricas operacionais consolidadas. Segundo Baker e Canessa (2009) e Ballou (2015), os principais indicadores abrangem:

- Capacidade estática total: número de posições-palete disponíveis;
- Taxa de ocupação volumétrica: percentual de aproveitamento cúbico do espaço útil;
- Tempo médio de ciclo: duração total das operações de movimentação e picking;
- Acuracidade de inventário: grau de aderência entre o estoque físico e os registros sistêmicos;
- Preservação da integridade de carga: taxa de mitigação de avarias e perdas de materiais.

Esses parâmetros viabilizam a mensuração dos trade-offs entre custo de espaço, produtividade operacional e confiabilidade do fluxo logístico.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da pesquisa

A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso aplicado, de natureza empírica, com abordagem quantitativa e objetivo descritivo-propositivo (Yin, 2015). A unidade de análise compreende o armazém central de matérias-primas e insumos de uma empresa gráfica de grande porte, cuja configuração espacial apresentava saturação física.

3.2 Procedimentos de coleta de dados

A coleta de dados estruturou-se em três etapas:

- Mapeamento in loco no Gemba: visitas técnicas para observação direta dos fluxos de tráfego interno, tempos médios de manobra, pontos de interferência física e gargalos na recuperação de cargas;

- Levantamento dimensional métrico: medição rigorosa da área útil construída (864 m²), pé-direito útil disponível, largura de corredores e dimensões das unidades de carga padronizadas PBR (1000 x 1200 mm);

- Auditoria documental de inventário: levantamento histórico da acuracidade de estoque, registros de avarias por esmagamento em pilhas e confrontação com plantas arquitetônicas anteriores.

3.3 Procedimentos de análise e modelagem de cenários

Os dados coletados subsidiaram o diagnóstico do layout original e a modelagem matemática comparativa de dois cenários de verticalização seletiva:

- Cenário 1 (empilhadeira a combustão): Dimensionamento de corredores operacionais com largura de aproximadamente 3,50 a 4,00 m, exigida pelas características dimensionais e raio de giro do equipamento a GLP;

- Cenário 2 (empilhadeira elétrica retrátil/patolada): Dimensionamento de corredores operacionais otimizados com largura de aproximadamente 2,60 a 2,80 m, explorando a compacidade estrutural e menor raio de manobra da tração elétrica;

Os indicadores foram consolidados conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Evolução dos indicadores de armazenagem após a adoção do porta-pallets

Indicador operacional	Antes (Blocagem)	Depois (Verticalização)	Resultado evidenciado (Impacto / benefício)
Taxa de ocupação	82,30%	97,29%	Maior aproveitamento do espaço físico
Tempo médio de movimentação	2,5 min	2,0 min	Redução do tempo de operação de ciclo
Acuracidade de inventário	79,00%	88,00%	Aumento do controle de estoques e rastreabilidade
Densidade volumétrica	0,90 m³/palete	0,67 m³/palete	Maior compactação e racionalização volumétrica

Fonte: Elaboração própria baseada nos dados do estudo de caso (2026).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Diagnóstico do layout original em blocagem

A instalação sob estudo totaliza 864 m² (48 m de comprimento por 18 m de largura). Originalmente, o galpão operava sob blocagem horizontal direta no piso, disponibilizando 592 posições-palete estáticas. Esse modelo gerava graves disfunções operacionais:

- Corredores excessivamente estreitos e irregulares (cerca de 1,65 m em determinados trechos de acesso pedestre e de difícil circulação de carga);

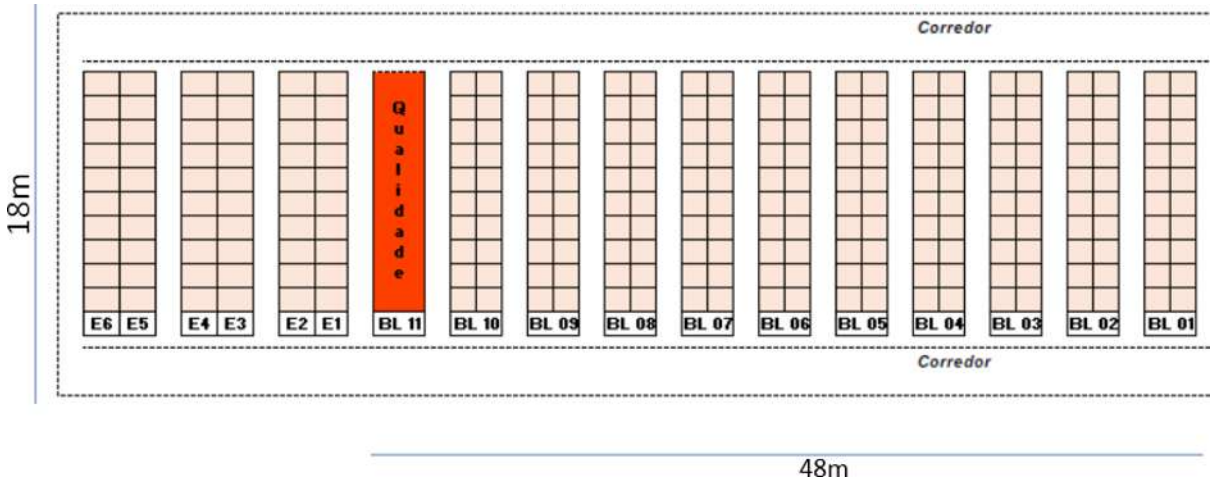
- Inacessibilidade aos paletes estocados no núcleo das fileiras profundas, exigindo manobras secundárias (re-handling) para retirada de itens bloqueados;

- Impossibilidade de cumprimento rigoroso da política FIFO (First-In, First-Out), levando à permanência prolongada de resmas e bobinas no fundo das pilhas;

- Degradação mecânica e perdas materiais causadas pela compressão estática excessiva das camadas inferiores.

O arranjo físico inicial e a distribuição espacial dos 11 blocos de estocagem sobre a área de 864 m² encontram-se representados na Figura 1.

Figura 1 – Layout original do armazém em blocagem horizontal



Fonte: Elaboração dos autores (2026).

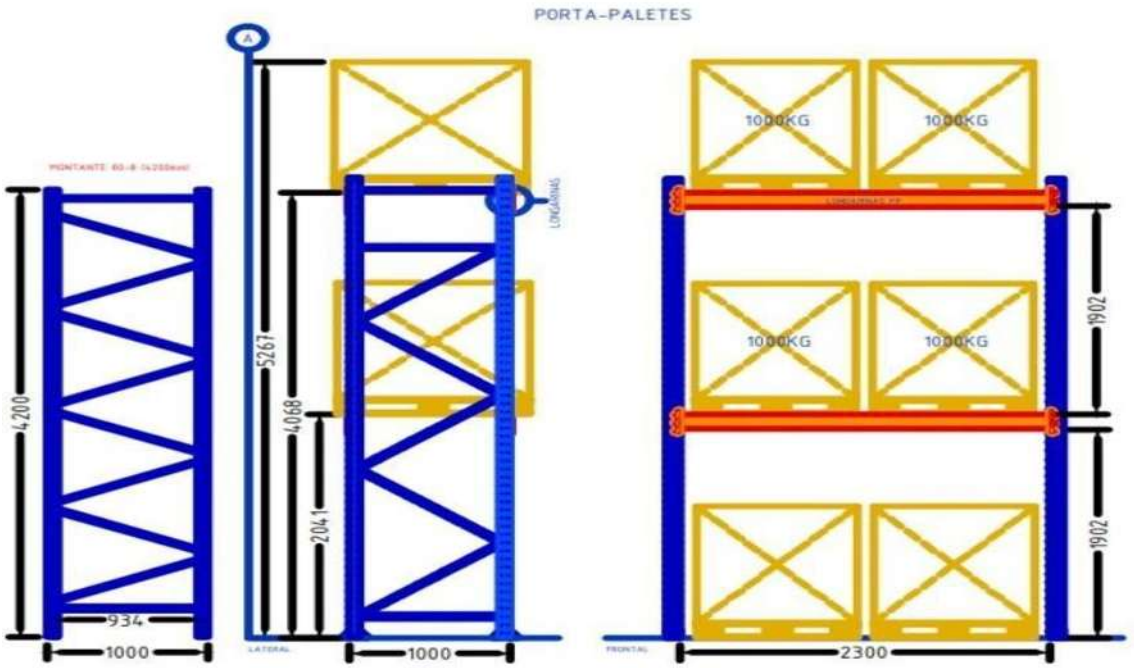
A Figura 1 evidencia a dispersão desordenada dos blocos no piso, onde a exigüidade dos corredores compromete diretamente o fluxo de picking e impede a aplicação contínua do conceito FIFO, resultando no aprisionamento de lotes e no esmagamento das camadas inferiores.

4.2 Proposta do sistema porta-paletes convencional

A alternativa técnica adotada consistiu na implantação de estruturas metálicas porta-paletes convencionais com montantes verticais de alta capacidade e longarinas tubulares ajustáveis, com capacidade dimensionada para até 1.000 kg por plano de apoio (2.000 kg por vão útil de 2.300 mm). A verticalização assegurou independência total de sustentação mecânica a cada palete PBR, extinguindo as perdas por esmagamento e viabilizando a visibilidade integral das etiquetas de identificação de estoque.

As especificações técnicas, parâmetros dimensionais e capacidades nominais de carga da estrutura modular adotada estão detalhadas na Figura 2.

Figura 2 – Detalhamento dimensional e capacidade de carga da estrutura porta-paletes



Fonte: Elaboração dos autores (2026).

Como ilustrado na Figura 2, a distribuição da carga em múltiplos níveis independentes transfere os esforços de peso para a estrutura metálica, erradicando totalmente a compressão direta sobre as pilhas de papel e garantindo seletividade imediata para cada palete.

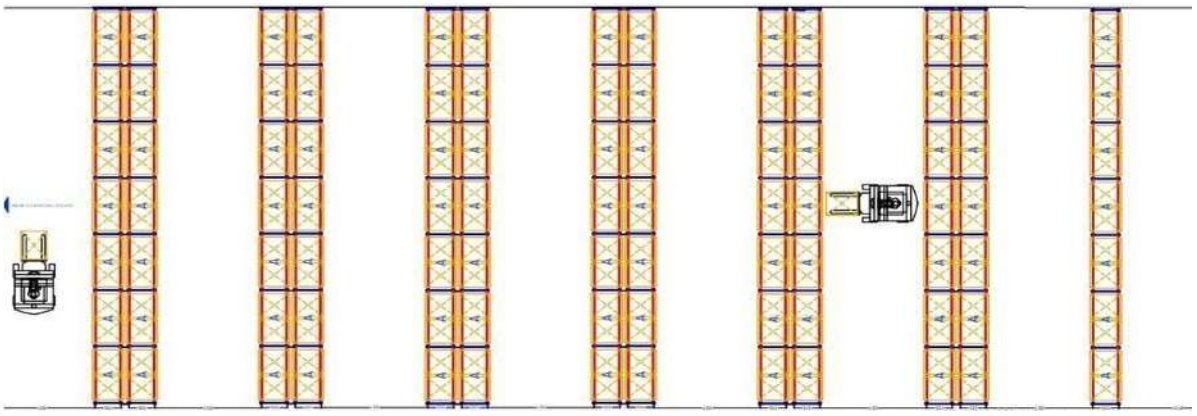
4.3 Análise comparativa dos cenários

Cenário 1: operação com empilhadeira a combustão

A implantação de 13 módulos/baterias de porta-paletes elevou a capacidade estática do armazém para 786 posições-palete, representando um ganho volumétrico de 32,77% (+33%) sobre a capacidade original de 592 posições. Não obstante o ganho expressivo de organização, a expansão física foi limitada pela largura exigida para os corredores de manobra (em torno de 3,50 a 4,00 m), inerente às restrições cinemáticas da empilhadeira a combustão.

A configuração resultante do arranjo físico para a operação com empilhadeira a combustão, evidenciando o dimensionamento das 13 baterias e os respectivos corredores operacionais, é apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Arranjo físico otimizado para operação com empilhadeira a combustão (Cenário 1)



Fonte: Elaboração dos autores (2026).

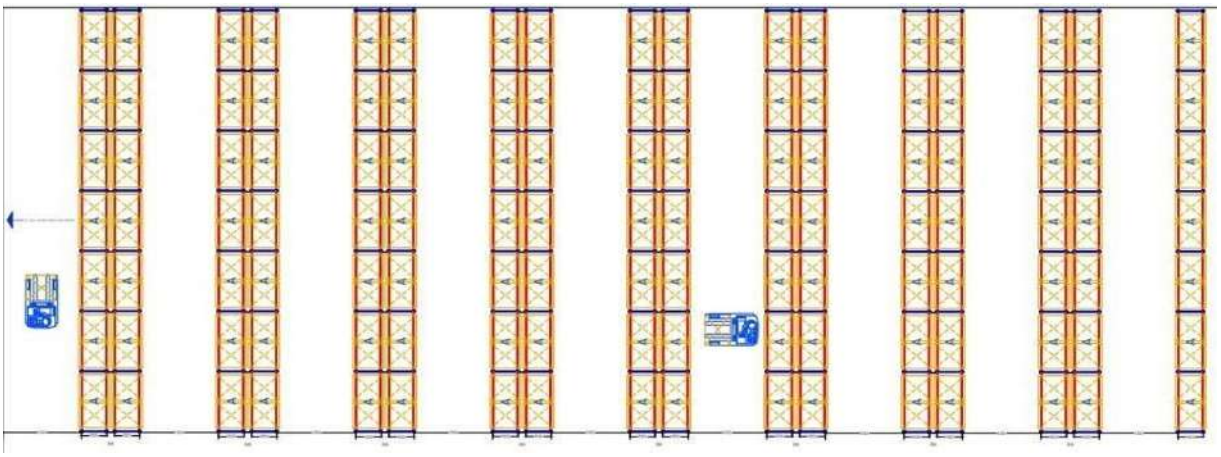
A representação do Cenário 1 na Figura 3 deixa claro o trade-off de área útil: a necessidade de manter corredores largos para acomodar o raio de giro do equipamento a combustão consome espaço precioso que poderia ser convertido em posições de estocagem.

Cenário 2: operação com empilhadeira elétrica

Com a introdução de empilhadeiras elétricas compactas, dotadas de menor raio de giro de manobra, a largura entre longarinas pôde ser reduzida com total conformidade operacional para a faixa de 2,60 a 2,80 m. Isso viabilizou a acomodação de 17 baterias de porta-paletes, totalizando 954 posições-palete. O ganho atingiu 61,15% (+62%) em relação à configuração original, sem adição de qualquer metro quadrado à planta predial existente.

O layout otimizado para operação com empilhadeira elétrica, contemplando a alocação de 17 baterias e o estreitamento dos corredores para 2,60–2,80 m, está ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Arranjo físico otimizado para operação com empilhadeira elétrica (Cenário 2).



Fonte: Elaboração dos autores (2026).

Em comparação direta com a Figura 3, o arranjo visualizado na Figura 4 demonstra o ganho de densidade volumétrica obtido ao estreitar os corredores operacionais, permitindo a inclusão de 4 baterias adicionais de porta-paletes na mesma área física de 864 m².

4.4 Discussão e análise crítica à luz da teoria

Os resultados empíricos dialogam de modo estreito com a literatura de engenharia de instalações (Tompkins et al., 2010; Baker e Canessa, 2009). A comparação direta entre os cenários 1 e 2 esclarece a relação quantitativa entre a especificação da máquina de elevação e o coeficiente de aproveitamento de piso (floor utilization): a opção por equipamentos elétricos com menor raio de giro desbloqueou área útil suficiente para a instalação de 4 baterias adicionais de porta-paletes, promovendo um diferencial de 168 posições adicionais (+29% sobre o Cenário 1). No plano operacional, a elevação da acuracidade de inventário de 79% para 88% e a diminuição do tempo médio de movimentação de 2,5 para 2,0 minutos (ganho de 20% em velocidade de atendimento) decorrem diretamente da substituição da blocagem cega pelo acesso seletivo unitário, conforme postulado por Gu, Goetschalckx e McGinnis (2007) e de Koster, Le-Duc e Roodbergen (2007). Ao eliminar a necessidade de remover paletes frontais para alcançar insumos traseiros, o sistema suprimiu a movimentação dupla, reduzindo o tempo de máquina ociosa e mitigando drasticamente os choques mecânicos contra matérias-primas de alto custo (bobinas e papéis couché). A contração do índice volumétrico de 0,90 m³/palete para 0,67 m³/palete atesta uma armazenagem mais densa e compacta, alinhada aos modernos conceitos de racionalização cúbica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou a reconfiguração logística de um armazém de indústria gráfica sob severas restrições espaciais, avaliando o impacto da transição do modelo de blocagem direta para a verticalização seletiva com porta-paletes. As evidências empíricas demonstraram saltos de capacidade estática expressivos: +33% (786 posições) com o uso de empilhadeiras a combustão e +62% (954 posições) mediante empilhadeiras elétricas em corredores estreitos.

Do ponto de vista qualitativo e de gestão, a intervenção conferiu estabilidade ao fluxo intralogístico: aumentou a acuracidade de estoques em 9 pontos percentuais, diminuiu em 20% o tempo médio de ciclo de movimentação e extinguiu avarias por compressão direta de pilhas, assegurando o

cumprimento estrito do FIFO. Os resultados comprovam que a verticalização combinada à especificação adequada de equipamentos de movimentação constitui uma resposta de alta eficiência operacional para a expansão de capacidade sem custos vultosos de expansão predial civil.

Como limitações da pesquisa, registra-se o foco centrado nos parâmetros geométricos e na capacidade estática, sem a inclusão de uma modelagem financeira exaustiva de retorno sobre o investimento (ROI/Payback) ou do balanço de emissões energéticas. Para trabalhos futuros, recomenda-se:

1- Avaliação do custo do ciclo de vida (LCC) e viabilidade econômico-financeira comparativa entre aquisição e locação de frotas elétricas versus a combustão;

2- Modelagem dinâmica de trajetórias de empilhadeiras e simulação estocástica de tráfego interno em períodos de pico de produção gráfica;

3- Estudos de integração do arranjo físico a sistemas automatizados de gerenciamento de armazém (WMS) com identificação por código de barras/RFID.

REFERÊNCIAS

BAKER, P.; CANESSA, M. Specification and design of automated and conventional warehouses: a methodology. Computers & Industrial Engineering, v. 57, n. 1, p. 56–69, 2009.

BALLOU, R. H. Logística empresarial: transporte, administração de materiais e distribuição física. São Paulo: Atlas, 2015.

BANZATO, E. Sistemas de armazenagem: conceitos e aplicações. São Paulo: Imam, 2020. BUCKOW, J.-N.; GOERIGK, M.; KNUST, S. Integrated pallet retrieval and processing in warehouses under practical constraints. OR Spectrum, v. 47, n. 1, p. 1–25, 2025.

DE KOSTER, R.; LE-DUC, T.; ROODBERGEN, K. J. Design and control of warehouse order picking: a literature review. European Journal of Operational Research, v. 182, n. 2, p. 481–501, 2007.

GU, J.; GOETSCHALCKX, M.; MCGINNIS, L. F. Research on warehouse design and performance evaluation: a comprehensive review. European Journal of Operational Research, v. 177, n. 1, p. 1–20, 2007.

MOURA, R. Paletização e unitarização de cargas. Rio de Janeiro: Interciência, 2019.

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; JOHNSTON, R. Administração da produção. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

TOMPKINS, J. A.; WHITE, J. A.; BOZER, Y. A.; TANCHOCO, J. M. A. Facilities Planning. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.

YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

Capítulo 24

10.37423/260911447

BIOMETANO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA BRASILEIRA

Calisto Nonato SilvaJunior — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná — Campus Francisco Beltrão*

Fernanda Calioni Schmainski — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná — Campus Francisco Beltrão*

Luiz Gustavo Schneider — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná — Campus Francisco Beltrão*

Fernanda R. de Almeida Cordeiro de Gois — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná — Campus Francisco Beltrão*

Wagner Da Silveira — *Universidade Tecnológica Federal do Paraná — Campus Francisco Beltrão*

Resumo

O aproveitamento energético de resíduos agroindustriais pode associar o tratamento da maté-ria orgânica à substituição de combustíveis fósseis, desde que o desempenho seja avaliado ao longo de toda a cadeia produtiva. Este capítulo examina as condições técnicas, infraestrutu-rais e socioambientais para a produção e utilização de biometano no Brasil. A análise reúne literatura científica clássica e recente, documentos de planejamento energético, regulamen-tação brasileira e informações institucionais sobre uma experiência do setor sucroenergético. São discutidos a digestão anaeróbia, as tecnologias de purificação do biogás, as alternativas de distribuição e a gestão do digestato. O empreendimento Cocal–Geo, em Narandiba, São Paulo, exemplifica a articulação entre resíduos locais e demanda industrial. Em balanço ilus-trativo independente desse empreendimento, uma alimentação de 43.200 Nm³ de biogás por dia, com 60% de metano, resulta em aproximadamente 26.595 Nm³ de biometano por dia e 914 GJ diários, nas condições adotadas. A análise mostra que pureza do produto, recuperação de metano e benefício climático são indicadores distintos. O controle de emissões fugitivas, o aproveitamento agronômico responsável do digestato e a proximidade entre oferta e con-sumo condicionam a sustentabilidade da cadeia. Conclui-se que a expansão do biometano requer projetos adaptados ao território, integração de processos e comprovação de desempe-nho ambiental, além da disponibilidade de biomassa.

Palavras-chave: digestão anaeróbia; biogás; resíduos agroindustriais; descarbonização; sus-tentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A transição energética envolve mudanças na produção e no uso da energia, na infraes-trutura e na gestão dos recursos naturais. Nesse processo, o biometano de resíduos agroindus-triais oferece uma possibilidade de integração entre o tratamento de fluxos orgânicos e o fornecimento de combustível renovável. Sua contribuição depende, entretanto, de converter uma disponibilidade dispersa de matéria-prima em produção regular, qualidade controlada e atendimento a consumidores. Entretanto, a existência de resíduos, isoladamente, não de-monstra a viabilidade de uma cadeia energética (IEA, 2025).

No Brasil, essa discussão se relaciona à presença de atividades sucroenergéticas, pecu-árias e alimentícias que geram efluentes e resíduos biodegradáveis. Vinhaça, torta de filtro, dejetos animais e resíduos do processamento de alimentos apresentam características dife-rentes de umidade, composição e sazonalidade. Quando manejados inadequadamente, podem contribuir para a poluição da água e do solo e para emissões atmosféricas. A digestão anae-róbia permite recuperar parte da energia química desses materiais, mas exige compatibilida-de entre a matéria-prima, o reator e o destino dos produtos gerados (Kunz; Steinmetz; Ama-ral, 2022).

O biometano resulta do tratamento do biogás para elevar sua concentração de metano e adequar sua qualidade ao uso pretendido, que pode envolver calor industrial, transporte ou fornecimento por redes de gás. A transformação do biogás em biometano, contudo, acrescen-ta operações de separação, consumo de utilidades e exigências de controle. Por isso, a deci-são de purificar deve ser comparada com alternativas de utilização do próprio biogás, consi-derando a demanda local e o desempenho do sistema completo (Ryckebosch; Drouillon; Vervaeren, 2011; Angelidaki et al., 2018).

Este capítulo examina em quais condições a produção de biometano a partir de resí-duos agroindustriais pode contribuir para a descarbonização brasileira. A discussão articula os fundamentos dos processos, as alternativas de distribuição e as consequências ambientais e territoriais e a sustentabilidade dessa rota depende da integração entre conversão eficiente, controle das perdas de metano, gestão do digestato e organização do mercado consumidor. Assim, a avaliação ultrapassa o volume de combustível produzido, considerando os efeitos do empreendimento sobre o manejo dos resíduos e o uso da energia.

2 ESCOPO E ABORDAGEM DA ANÁLISE

O capítulo adota uma revisão narrativa de caráter técnico e documental. A fundamen-tação combina estudos sobre digestão anaeróbia, separação de gases, emissões de metano e aproveitamento de digestato com documentos da Empresa de Pesquisa Energética, da Agên-cia Internacional de Energia e de órgãos brasileiros. O enquadramento regulatório considera as informações oficiais. Essa abordagem permite discutir relações entre processos e sustenta-bilidade, sem pretender representar uma revisão sistemática ou um levantamento exaustivo do mercado.

3 BIOMETANO A PARTIR DE MATÉRIA ORGÂNICA

3.1 Caracterização e disponibilidade dos resíduos

O dimensionamento começa pela caracterização da alimentação. Além da quantidade disponível, devem ser considerados o teor de sólidos, a fração orgânica biodegradável, a pre-sença de materiais inertes e o perfil de geração ao longo do ano. A massa total de um resíduo úmido não representa sua capacidade de produzir metano. A composição também influencia as necessidades de homogeneização, bombeamento e pré-tratamento, assim como o tempo necessário para a conversão biológica (Weiland, 2010).

No setor sucroenergético, a vinhaça é um efluente líquido da produção de etanol, en-quanto a torta de filtro provém da clarificação do caldo de cana. A utilização conjunta dessas correntes pode integrar a produção de biogás às estruturas existentes das usinas. O planeja-mento, entretanto, precisa considerar a safra, o armazenamento e os usos já atribuídos aos resíduos. Estimativas de potencial devem distinguir material teoricamente disponível, fração recuperável e produção economicamente acessível, sem somar como excedente uma biomas-sa já comprometida com outras funções – as quais são muitas dentro da indústria canavieira (EPE; CIBiogás, 2023).

A codigestão, entendida como o processamento conjunto de dois ou mais substratos, pode melhorar o equilíbrio da alimentação e ampliar o aproveitamento de instalações. Seus efeitos dependem da proporção utilizada e da compatibilidade entre os materiais. Uma mis-tura com maior teor de matéria orgânica não necessariamente proporciona operação mais estável: cargas excessivas, compostos inibidores ou alterações bruscas na composição podem comprometer a atividade microbiana. A

avaliação deve associar caracterização, ensaios de biodegradabilidade e acompanhamento operacional (Ward et al., 2008; Chen; Cheng; Cre-amer, 2008).

3.2 A conversão biológica e a estabilidade operacional

A digestão anaeróbia envolve microrganismos que convertem matéria orgânica na au-sência de oxigênio molecular. Hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese descre-vem funções biológicas interdependentes, que podem ocorrer simultaneamente no mesmo reator. Na hidrólise, macromoléculas são convertidas em compostos menores; na acidogêne-se, formam-se ácidos orgânicos, álcoois e outros intermediários; na acetogênese, parte desses produtos é transformada em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. A transferência de intermediários entre populações microbianas sustenta o funcionamento do conjunto (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022).

A produção de metano é realizada por arqueias metanogênicas por duas rotas relevan-tes, que são a acetoclástica e a hidrogenotrófica, representadas pelas Equações 1 e 2. Na pri-meira, a forma iônica do acetato exige a presença de um próton para o balanceamento de massa e carga. Na segunda, o hidrogênio atua como doador de elétrons na redução do dióxi-do de carbono. A proporção entre as rotas depende do substrato e das condições do processo (Weiland, 2010).

$$CH_3COO^- + H^+ \rightarrow CH_4 + CO_2 \quad (1)$$

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \quad (2)$$

O controle operacional deve conciliar carga orgânica, retenção da biomassa, tempera-tura, mistura e capacidade de tamponamento. O aumento da alimentação precisa respeitar a velocidade de conversão dos intermediários pois, a produção de ácidos pode superar seu con-sumo e desestabilizar o sistema. Medidas de pH, alcalinidade, ácidos graxos voláteis, vazão e composição do gás fornecem informações complementares de acompanhamento. A interpre-tação conjunta desses indicadores mostra a sinergia da ecologia dentro do reator, enquanto observar estes resultados de forma independente pode induzir interpretações equivocadas (Ward et al., 2008).

Alem, disso, compostos nitrogenados, sulfetos, sais e determinadas substâncias orgâni-cas podem causar inibição, dependendo da concentração e da adaptação microbiana. No caso do nitrogênio amoniacal, a distribuição entre amônio e amônia livre varia com pH e tempe-ratura, alterando o potencial de toxicidade. Por isso, não convém transferir limites operacio-nais entre substratos e

reatores sem avaliar as condições em que foram obtidos. A estabilida-de biológica constitui um requisito de projeto e de operação contínua, não apenas uma etapa da partida (Chen; Cheng; Creamer, 2008).

O biogás produzido contém predominantemente metano e dióxido de carbono. A faixa de 50% a 70% de CH_4 é frequente em descrições de digestão anaeróbia, mas não constitui uma composição universal. Vapor de água, H_2S e outros componentes variam com a alimen-tação e o processo. Siloxanos, por exemplo, não devem ser presumidos como contaminantes relevantes em toda instalação agroindustrial. A seleção do tratamento deve partir da caracte-rização do gás efetivamente produzido (Ryckebosch; Drouillon; Vervaeren, 2011).

3.3 Limpeza do gás e tecnologias de purificação

A limpeza do biogás e sua purificação para biometano desempenham funções com-plementares. A primeira reduz constituintes prejudiciais aos equipamentos e ao uso final, como umidade e compostos sulfurados; a segunda separa principalmente CO_2 e CH_4 para aumentar a concentração do componente combustível. A sequência de operações depende da tecnologia adotada e das especificações de saída. Além disso, é importante considerar que a eficiência de remoção destes contaminantes depende de várias etapas (Ryckebosch; Drouil-lon; Vervaeren, 2011).

Na lavagem com água, por exemplo, diferenças de solubilidade permitem absorver preferencialmente CO_2 sob pressão. Na adsorção por oscilação de pressão, conhecida como PSA, sólidos porosos separam componentes e são regenerados ciclicamente. Nas membranas poliméricas, diferenças de permeabilidade promovem a separação, com arranjos de estágios e recirculação que afetam a recuperação de metano. A absorção química utiliza solventes que reagem com o CO_2 e demandam regeneração. O Quadro 1 sintetiza as principais impli-cações dessas alternativas (Angelidaki et al., 2018).

Quadro 1 — Características de tecnologias de purificação do biogás

Tecnologia	Princípio	Aspectos de projeto
Lavagem com água	Absorção física preferencial do CO_2.	Compressão, circulação e regeneração da água; recuperação de CH_4 dissolvido.

Tecnologia	Princípio	Aspectos de projeto
PSA	Adsorção seletiva e regeneração por variação de pressão.	Pré-tratamento, ciclos dos leitos e gestão do gás de regeneração.
Membranas	Separação por diferenças de permeabilidade.	Pré-tratamento, pressão, estágios e recirculação para controlar pureza e recuperação.
Absorção química	Reação do CO_2 com solventes, como aminas.	Calor de regeneração, manejo do solvente e integração térmica.

Fonte: elaboração própria, com base em Ryckebosch, Drouillon e Vervaeren (2011) e Ange-lidaki et al. (2018).

A escolha do processo exige distinguir pureza, recuperação e consumo específico. Pu-reza é a fração de metano no produto; recuperação corresponde à parcela do metano alimen-tado que alcança esse produto. Um gás de elevada pureza pode ser obtido com perda signifi-cativa de combustível em outras correntes. As comparações entre fornecedores também de-vem informar se o consumo de energia se refere ao volume de biogás alimentado ou ao vo-lume de biometano produzido, bem como as pressões de entrada e saída (Angelidaki et al., 2018).

Dessa distinção decorre um critério de projeto: a tecnologia mais adequada é aquela que atende à qualidade requerida com recuperação, disponibilidade e custos compatíveis com a instalação. Uma unidade modular pode facilitar ampliações, mas ainda precisa de pré-tratamento e manutenção. A existência de calor disponível pode favorecer uma configuração com regeneração térmica; a distância do consumidor pode elevar o peso da compressão. A comparação deve abranger a cadeia completa, evitando classificar um processo como supe-rior apenas por sua pureza nominal (Ryckebosch; Drouillon; Vervaeren, 2011; Angelidaki et al., 2018).

4 INSERÇÃO DO BIOMETANO NA MATRIZ ENERGÉTICA

4.1 Qualidade do combustível e compatibilidade de uso

O biometano tem potencial de substituir gás natural em aplicações compatíveis com a composição e as condições de fornecimento especificadas. Isso não significa que qualquer gás rico em metano possa ser utilizado indistintamente em qualquer equipamento diretamen-te sem ajustes. Poder calorífico, índice de Wobbe, contaminantes, pressão e características da instalação influenciam essa

intercambialidade. Assim, essa conformidade deve ser verifi-cada para o combustível e para sua aplicação, conforme os requisitos técnicos e regulatórios pertinentes (ANP, 2026a).

Neste contexto, é necessário distinguir poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI), onde o PCS inclui o calor recuperável pela condensação da água formada na combustão; e o PCI considera essa água no estado de vapor. Além disso, valores por unidade de volume de-pendem das condições de referência do gás. Assim, uma comparação entre combustíveis exige a mesma convenção calorífica e a indicação de temperatura, pressão e condição seca ou úmida. Neste capítulo, o exemplo numérico utiliza PCI e explicita sua base volumétrica (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022).

No transporte, a substituição do diesel demanda veículos e sistemas de abastecimento adequados ao combustível gasoso. A compatibilidade do biometano com equipamentos pro-jetados para gás natural não equivale à possibilidade de abastecer diretamente um motor convencional a diesel. A avaliação deve considerar autonomia, capacidade de armazenamen-to, infraestrutura e eficiência no ciclo de operação. Para isso uma comparação útil relaciona energia consumida ao serviço prestado, como distância percorrida ou carga transportada, além do preço por unidade de combustível (IEA, 2025).

Também deve ser examinada a utilização do biogás no próprio empreendimento. Quando há demanda térmica próxima e compatível, seu aproveitamento após a limpeza ne-cessária pode evitar etapas adicionais de purificação. Em cogeração, o benefício depende do uso efetivo tanto da eletricidade quanto do calor disponível. Assim, atualmente se vê a pro-dução de biometano como uma escolha justificada pela demanda, pelos custos e pelo desem-penho ambiental, não uma etapa obrigatória para todo digestor anaeróbio (Weiland, 2010; Angelidaki et al., 2018).

4.2 Alternativas de distribuição e organização territorial

A infraestrutura de distribuição é de grande importância pois conecta a produção dis-persa aos centros de consumo. O estudo da IEA (2025) estima que menos de 5% do potencial brasileiro de biometano se localize a até 10 km de gasodutos de transporte, nas condições de seu levantamento. Esse indicador se refere à rede de transporte considerada no estudo e não representa a cobertura de todas as redes locais de distribuição. Ainda assim, evidencia a ne-cessidade de avaliar soluções territoriais específicas, em vez de pressupor conexão imediata à malha existente, a qual pode não estar disponível em determinadas regiões do país.

O fornecimento pode ocorrer por redes locais, conexão às redes disponíveis ou trans-porte rodoviário do gás comprimido ou liquefeito. Cada alternativa incorpora exigências próprias de armazenamento, operação e entrega. O chamado gasoduto virtual corresponde à logística por veículos e têm custos de transporte e emissões associadas. A liquefação é uma alternativa que aumenta a densidade de armazenamento, mas por outro lado, acrescenta con-sumo energético e gestão criogênica; sendo sua conveniência dependente de escala, distância e perfil de demanda (ANP, 2026a; IEA, 2025).

A proximidade entre matéria-prima, planta e consumidor deve então ser capaz de ori-entar a comparação entre configurações pois, centralizar o processamento pode melhorar o aproveitamento de equipamentos, ao passo que amplia a área de coleta e o transporte de re-síduos úmidos. Assim, descentralizar a digestão e organizar a coleta do gás pode reduzir par-te dessa movimentação, ao custo de novos sistemas de conexão e coordenação. No setor su-croenergético, por exemplo, a integração com instalações e consumidores existentes consti-tui uma das alternativas discutidas para a estruturação do mercado (EPE; CIBiogás, 2023).

Por fim, a capacidade de armazenar gás pode conferir flexibilidade ao uso energético, desde que o volume de armazenamento e os equipamentos sejam dimensionados para isso. A resposta biológica do digestor, entretanto, não é instantânea: variações de alimentação preci-sam respeitar a estabilidade do processo. A programação do consumo depende da combina-ção entre produção, armazenamento e contratos e a flexibilidade deve ser demonstrada no projeto, sem confundir produção contínua de gás com disponibilidade ilimitada para respon-der a qualquer variação de demanda (Ward et al., 2008).

4.3 Qualidade comercial e instrumentos de descarbonização

O marco brasileiro de qualidade evoluiu após os regulamentos iniciais sobre biometa-no. No recorte temporal desta análise, a ANP identifica a Resolução nº 1.006, de 11 de agos-to de 2026, como referência para especificações e controle da qualidade do produto destina-do a usos veiculares, residenciais, industriais e comerciais. A norma contempla requisitos analíticos e condições específicas de comercialização. Portanto, não é adequado apresentar um único teor de CH_4 como critério suficiente de conformidade ou utilizar a Resolução nº 8/2015 como referência vigente isolada (ANP, 2026a).

A política de descarbonização constitui uma dimensão distinta da qualidade do com-bustível. A Lei nº 13.576/2017 instituiu a Política Nacional de Biocombustíveis, o Renova-Bio, que relaciona a

certificação da produção e a comercialização de biocombustíveis à emissão de Créditos de Descarbonização, os CBIOs, nas condições previstas no programa. A participação de uma unidade depende do atendimento aos requisitos de certificação e regis-tro. Assim,a origem renovável, por si só, não assegura uma receita automática de créditos (Brasil, 2017).

A Lei nº 14.993/2024, conhecida como Lei do Combustível do Futuro, acrescentou ins-trumentos para incentivar a geração e uso do biometano e contribuir para a redução das emissões associadas ao gás natural. Em 2026, a ANP aprovou regulamentação sobre metas e certificação de origem, incluindo o Certificado de Garantia de Origem do Biometano, o CGOB. Esse instrumento possui finalidade e regras próprias, que não devem ser confundidas com as dos CBIOs. Assim, a análise financeira precisa identificar quais receitas são efetiva-mente elegíveis e evitar a contagem duplicada de benefícios ambientais (Brasil, 2024; ANP, 2026b).

5 DESEMPENHO AMBIENTAL E GESTÃO DO DIGESTATO

5.1 Benefícios climáticos e fronteiras da avaliação

O benefício climático do biometano depende muito da comparação com um cenário de referência. O aproveitamento de resíduos anteriormente destinados a condições favoráveis à emissão de metano pode evitar parte dessas emissões e ainda substituir energia fóssil. Se o manejo anterior já incluía captura eficiente do gás, o benefício adicional pode ser diferente numa perspectiva de gestão inteligente de resíduos. Uma avaliação de ciclo de vida precisa explicitar o destino dos resíduos na ausência do projeto, o combustível substituído, a energia consumida e o tratamento dos coprodutos (IEA, 2025; Bakkaloglu; Cooper; Hawkes, 2022).

A origem biogênica do carbono não torna irrelevante o metano liberado para a atmos-fera, como mostra o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC para o CH_4 não fóssil, mostrando um potencial de aquecimento global de 27,0 em horizonte de 100 anos. Esse fator expressa equivalência de efeito climático por unidade de massa, segundo a métrica adotada; e sua aplicação exige coerência quanto à origem do metano e ao horizonte temporal escolhido (IPCC, 2021).

Emissões podem ocorrer em reservatórios, conexões, dispositivos de alívio, sistemas de purificação e manejo do digestato. Uma revisão com análise probabilística identificou distri-buição desigual das emissões entre instalações e destacou a importância de fontes com con-tribuição elevada. Assim, a

recuperação nominal da unidade de purificação não basta para representar a integridade de toda a cadeia. Medição, manutenção e tratamento de correntes residuais precisam integrar a avaliação ambiental e operacional (Bakkaloglu; Cooper; Haw-kes, 2022).

Evidência recente reforça essa necessidade. Olczak et al. (2026), em levantamento de 31 plantas na Alemanha, na Polônia e no Reino Unido, observaram ampla variabilidade das emissões e estimaram oportunidades de mitigação com benefícios econômicos sob as condi-ções estudadas. Esses resultados não fornecem um fator de emissão representativo do Brasil, mas demonstram a importância das condições de operação, dos eventos anormais e da abran-gência das medições. Seu uso mais pertinente é orientar o monitoramento, e não transferir médias estrangeiras diretamente para projetos nacionais.

A leitura conjunta dessas evidências impede atribuir uma redução percentual única a todo biometano e o resultado depende das fronteiras da avaliação e de dados sobre alimenta-ção, utilidades, transporte, perdas e uso final. Uma unidade funcional, como energia entregue ou serviço de transporte realizado, facilita a comparação entre alternativas. Dessa maneira, alegações de redução devem informar a base de cálculo e as incertezas, sobretudo quando incorporam créditos por emissões evitadas no manejo de resíduos (Bakkaloglu; Cooper; Hawkes, 2022; Olczak et al., 2026).

5.2 Reciclagem de nutrientes e riscos locais

O digestato é o material remanescente da digestão anaeróbia e contém água, frações orgânicas e nutrientes. Sua composição pode ser bem variada e depende da composição da alimentação e das transformações que ocorreram dentro do reator. A conversão de parte do nitrogênio orgânico em formas amoniacais pode alterar sua disponibilidade para as plantas, mas não garante maior eficiência agronômica em qualquer condição de utilização. Assim, o valor fertilizante precisa ser avaliado em relação à composição do material, às exigências da cultura e ao manejo empregado (Möller; Müller, 2012).

Nessa linha de pensamento, o aproveitamento agrícola responsável exige análise do di-gestato e do solo, definição de doses e consideração da época de aplicação. A substituição de fertilizantes minerais deve corresponder aos nutrientes efetivamente disponibilizados, evi-tando equivalências apenas volumétricas. Também é necessário contabilizar outras fontes de adubação utilizadas na mesma área. Esses cuidados de balanço de massa permitem relacio-nar a valorização energética ao manejo de

nutrientes, sem presumir que a digestão resolva automaticamente os excedentes de nitrogênio e fósforo (Möller; Müller, 2012).

Como consequência de armazenamento e de aplicação inadequados pode-se provocar volatilização de amônia, perdas de nutrientes e contaminação ambiental. Além disso, depen-dendo da origem, metais e outros constituintes indesejáveis também precisam ser considera-dos. A digestão não assegura, em todas as condições, a eliminação de patógenos nem trans-forma qualquer efluente em produto pronto para aplicação direta. Não existe milagre da transformação. Assim, Separação de frações, armazenamento protegido e tratamentos com-plementares devem ser definidos a partir da caracterização das correntes do biodigestor e do destino pretendido do efluente tratado (Nkoa, 2014; Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022).

A dimensão territorial é especialmente relevante onde há concentração de produção animal ou pouca área disponível para aplicação, possibilitando transformar disponibilidade em geração de de energia, mas não elimina a massa de nutrientes a ser manejada. O plane-jamento precisa identificar áreas receptoras, capacidade de transporte e medidas de preven-ção de perdas. Nessas condições, a circularidade deve ser demonstrada pelo retorno agronô-mico controlado dos nutrientes, e não apenas pela classificação do digestato como coproduto (Nkoa, 2014).

5.3 Critérios sociais e distribuição dos benefícios

A avaliação proposta neste capítulo inclui a distribuição local de benefícios e respon-sabilidades. Um empreendimento pode reduzir a exposição a resíduos mal manejados e criar demanda por serviços especializados, mas também intensificar o tráfego ou introduzir incô-modos operacionais. Por isso, recomenda-se incluir no planejamento rotas de transporte, con-trole de odores e ruído, segurança e canais de comunicação com as comunidades. Esses crité-rios complementam os indicadores energéticos e evitam que o desempenho seja avaliado exclusivamente pelo volume comercializado e garante uma integralização de variáveis im-portantes na avaliação de desempenho.

Nessa linha de pensamento, arranjos cooperativos ou compartilhados podem ser exa-minados para reunir oferta de pequenos produtores, estabelecendo padrões de recebimento, repartição de custos e responsabilidades pelo digestato. Como proposta de governança, o acesso aos benefícios deve ser acompanhado de capacidade técnica para operar e monitorar o sistema. Assim, a simples reunião de fornecedores cria um arranjo que favorece a regulari-dade da alimentação, a gestão e o mercado.

6 EXPERIÊNCIA BRASILEIRA E BALANÇO ILUSTRATIVO

6.1 Integração entre produção e consumo em Narandiba - SP

A experiência da Cocal em parceria com a Geo, localizada em Narandiba, São Paulo, ilustra a oportunidade de aproveitamento de resíduos sucroenergéticos. Em publicação de julho de 2024, a empresa informou o uso de vinhaça e torta de filtro e capacidade de produ-ção de até 25 mil m³ de biometano por dia a partir destes substratos, com início das opera-ções no final de 2021. Esses dados caracterizam a iniciativa mas não são uma de produção ou de eficiência ambiental (Cocal, 2024).

A infraestrutura de distribuição é parte relevante dessa experiência, que em fevereiro de 2023, Cocal e GasBrasiliano anunciaram o início de operação de uma rede exclusiva de biometano para atender atividades industriais na região de Presidente Prudente. O projeto descreveu aproximadamente 51 km de tubulação de aço e 14,5 km de polietileno, conectan-do a produção em Narandiba a consumidores regionais. (Cocal, 2023).

A principal lição deste caso é o desenho logístico que articula a geração de resíduos, a conversão e a demanda próxima. Entretanto, o seu uso aqui é como referência, porque sem atribuir à instalação qualquer detalhamento de tecnologia de purificação, taxa de recupera-ção ou redução de emissões, não se pode concluir que seja um caso de sucesso, embora seja um ótimo exemplo prático de viabilidade de instalação local. Para analisar essas grandezas, seria necessário conhecer vazões, composição, consumo de utilidades e condições de opera-ção. O balanço apresentado a seguir é independente dos dados empresariais e tem finalidade exclusivamente ilustrativa.

6.2 Hipóteses e balanço de metano

Considere-se uma unidade hipotética alimentada com 43.200 Nm³ de biogás por dia, contendo 60% de CH_4 e 40% de CO_2 em base seca. Adotam-se recuperação de metano de 98,5% e fração volumétrica de CH_4 no produto de 96%. Neste exemplo, Nm³ corresponde ao volume a 0 °C e 101,325 kPa, e todas as vazões são expressas nessa mesma base. A fração de 96% é uma hipótese de cálculo.

Admite-se comportamento de gás ideal e desprezam-se outros componentes para sim-plificar o balanço. A vazão de metano na alimentação, QCH_4, entrada, resulta do produto entre a vazão total de biogás, Qb, e sua fração de metano, yCH_4. A parcela recuperada no produto é obtida pela multiplicação

dessa vazão pela recuperação, ηrec. Finalmente, a vazão total de biometano, Qp, é calculada dividindo-se o metano recuperado pela fração de CH_4 no produto, xCH_4, conforme as Equações 3 a 5.

$$Q_{CH_4,entrada} = Q_b \times y_{CH_4} = 43.200 \times 0{,}60 = 25.920\ Nm^3/d \quad (3)$$

$$Q_{CH_4,produto} = Q_{CH_4,entrada} \times \eta_{rec} = 25.920 \times 0{,}985 = 25.531{,}2\ Nm^3/d \quad (4)$$

$$Q_p = Q_{CH_4,produto} / x_{CH_4} = 25.531{,}2 / 0{,}96 = 26.595\ Nm^3/d \quad (5)$$

O resultado mostra por que volume de metano e volume de biometano não são intercambiáveis. O produto contém 25.531,2 Nm³/d de CH_4 e 1.063,8 Nm³/d de CO_2, sob estas hipóteses adotadas. A corrente complementar contém 388,8 Nm³/d de CH_4 não recuperado no produto e 16.216,2 Nm³/d de CO_2. A soma das duas correntes preserva os balanços total e de componentes. Por fim, o metano presente nessa corrente complementar não deve ser automaticamente contabilizado como emissão atmosférica pois, seu destino pode incluir recuperação adicional ou oxidação controlada.

6.3 Conteúdo energético e demanda de utilidades

Adota-se para o metano puro PCI de 35,8 MJ/Nm³, valor aproximado na base volumétrica definida. Como o CO_2 não contribui para o poder calorífico, o PCI do produto com 96% de CH_4 é 34,368 MJ/Nm³. O conteúdo energético diário pode ser calculado pelo volume de metano recuperado ou pelo volume total de produto multiplicado por seu PCI. As duas formas conduzem ao mesmo resultado, expresso na Equação 6.

$$E_{produto} = (25.531{,}2 \times 35{,}8) / 1.000 \approx 914{,}0\ GJ/d \quad (6)$$

Multiplicar diretamente os 26.595 Nm³/d de produto pelo PCI do metano puro superestimaria a energia disponível, pois atribuiria poder calorífico à fração de CO_2. O valor de 914,0 GJ/d corresponde ao conteúdo químico do combustível produzido, antes da conversão em calor útil, eletricidade ou trabalho mecânico. Não representa energia líquida exportada nem incorpora automaticamente os consumos internos. A Tabela 1 reúne as hipóteses e os resultados do exemplo.

Tabela 1 — Hipóteses e resultados do balanço exemplo de purificação. Fonte: elaboração própria. Base seca, a 0 °C e 101,325 kPa. Valores calculados para mistura ideal de CH_4 e CO_2; não representam dados operacionais de empreendimento específico.

Grandeza	Valor	Natureza
Vazão de biogás seco	43.200 Nm³/d	Hipótese
CH_4 na alimentação	60% em volume	Hipótese
Recuperação de CH_4 no produto	98,5%	Hipótese
CH_4 no produto	96% em volume	Hipótese
PCI do CH_4 puro	35,8 MJ/Nm³	Valor aproximado adotado
CH_4 recuperado no produto	25.531,2 Nm³/d	Calculado
Vazão total do produto	26.595 Nm³/d	Calculado
PCI da mistura produzida	34,368 MJ/Nm³	Calculado
Energia química no produto	914,0 GJ/d	Calculado
CH_4 na corrente complementar	388,8 Nm³/d	Calculado

Para explicitar o papel das utilidades, adotaremos adicionalmente um consumo hipoté-tico de 0,20 kWh por Nm³ de biogás alimentado na etapa de purificação. Nessa condição, a demanda seria de 8.640 kWh/d, equivalentes a 31,1 GJ/d de energia elétrica. Esse parâmetro é apenas hipotético para fins didáticos, não constituindo dado de fornecedor nem referência de desempenho do caso. Também é importante destacar que esta estimativa não representa o consumo de toda a planta: agitação, aquecimento, bombeamento, tratamento do digestato e compressão para entrega precisariam ser contabilizados conforme o projeto.

Assim, uma equivalência com diesel pode ser construída apenas como comparação de conteúdo energético. Adotando-se, para esse fim, PCI de 38,5 MJ/L, os 914,0 GJ/d corres-pondem a aproximadamente 23,7 mil litros por dia. Por fim, esse resultado não demonstra substituição efetiva do mesmo volume em uma frota, onde a equivalência de serviço depen-de da eficiência dos motores, do ciclo de operação e das condições de abastecimento. A aná-lise econômica e ambiental também deve considerar o consumo associado ao serviço efeti-vamente realizado.

6.4 Sensibilidade às emissões de metano

Um segundo cálculo consegue ilustra o efeito climático de perdas na cadeia. Conside-re-se f como a fração do metano produzido que é emitida sem combustão, de modo que a parcela entregue seja 1 − f. Adotando-se PCI mássico aproximado de 50 MJ/kg, são necessá-rios 20 kg de CH_4 para fornecer 1 GJ de energia no combustível entregue. A massa perdida, por GJ entregue, é então 20f/(1 − f). Utilizando o fator de 27,0 kg CO_2e/kg CH_4 para metano não fóssil, obtém-se a Equação 7 (IPCC, 2021).

$$I_{CH_4} = 540 \times f / (1 - f) \quad [\text{kg } CO_2e/\text{GJ entregue}] \qquad (7)$$

A Tabela 2 apresenta cenários e seus resultados representam exclusivamente a contri-buição das emissões de CH_4 nessa fronteira simplificada de cálculo introdutório. Não inclu-em eletricidade, calor, transporte, manejo do digestato ou créditos por emissões evitadas, os quais podem adicionar uma camada extra de complexidade a este sistema. Ainda assim, mostram que perdas percentuais aparentemente pequenas podem acrescentar uma contribui-ção climática relevante. Este exemplo também evidencia a necessidade de informar o deno-minador utilizado, onde o percentual do metano produzido e percentual do metano entregue não são a mesma medida.

Tabela 2 — Contribuição climática ilustrativa das perdas de metano. Fonte: elaboração pró-pria, com PCI de 50 MJ/kg e GWP_{100} de 27,0 para CH_4 não fóssil (IPCC, 2021). A estimativa contempla apenas CH_4 emitido, sem os demais componentes de uma avaliação de ciclo de vida.

Fração do CH_4 produzido emitida	CH_4 emitido por energia entregue	Contribuição climática
1%	0,202 kg/GJ	5,45 kg CO_2e/GJ
3%	0,619 kg/GJ	16,70 kg CO_2e/GJ
5%	1,053 kg/GJ	28,42 kg CO_2e/GJ

7 CONDIÇÕES PARA EXPANSÃO E PRIORIDADES TECNOLÓGICAS

A análise desenvolvida permite organizar a avaliação de projetos em torno de cinco perguntas: qual matéria-prima está disponível ao longo do ano; qual configuração opera de forma estável; quem utilizará a energia; como serão controladas as perdas; e qual será o des-tino do digestato. Essas perguntas conectam o potencial de geração às condições de imple-mentação. Uma proposta robusta

deve respondê-las de forma conjunta, pois ganhos em uma etapa podem ser anulados por custos ou impactos transferidos a outra.

Na dimensão econômica, propõe-se avaliar o projeto em cenários de disponibilidade de substrato, demanda e custos de utilidades, sem assumir ocupação integral desde a partida. O custo do combustível entregue deve incluir recebimento, conversão, purificação, armazena-mento, transporte e destinação de resíduos e coprodutos. Receitas por serviços ambientais ou certificação precisam ser identificadas separadamente, conforme elegibilidade e contratos. Essa organização permite distinguir uma operação sustentada pelo mercado de energia de outra dependente de receitas complementares.

A inovação pode ocorrer tanto na conversão quanto na integração dos processos. A me-tanação biológica utiliza hidrogênio para converter CO_2 em metano adicional, conforme a reação hidrogenotrófica, por exemplo. Quando associada à eletrólise, essa rota transfere energia elétrica para um combustível armazenável. Entretanto, o aumento da produção de metano precisa ser avaliado em relação ao consumo e à origem da eletricidade, à transferên-cia de gás para o meio biológico e à integração operacional. Esta rota não cria energia a par-tir do CO_2 (Angelidaki et al., 2018).

O CO_2 separado também pode ser condicionado para usos específicos, desde que haja qualidade e demanda compatíveis. Como critério ambiental, recomenda-se distinguir sua utilização de seu armazenamento duradouro: empregar CO_2 em um processo que posterior-mente o libera não equivale à remoção permanente de carbono da atmosfera. O benefício deve ser demonstrado pela comparação entre alternativas e pelos destinos efetivos do carbo-no. Essa distinção impede somar receitas comerciais e reduções climáticas como se fossem resultados equivalentes.

O aprimoramento do monitoramento merece prioridade junto com novas rotas de con-versão. Medições de vazão e composição, identificação de vazamentos e registro de eventos anormais ajudam a localizar perdas que médias anuais podem ocultar. Sistemas digitais po-dem apoiar essa gestão quando alimentados por dados confiáveis e associados à manutenção. Evidências recentes sobre emissões indicam que a integridade da instalação e a resposta ope-racional são determinantes do desempenho, mesmo em tecnologias já estabelecidas (Olczak et al., 2026).

Para o planejamento público, a síntese deste capítulo favorece instrumentos capazes de aproximar oferta, demanda e comprovação de desempenho. Isso inclui formação técnica, disponibilidade de informação, coordenação territorial e critérios transparentes de avaliação. Redes locais, logística

rodoviária e conexão à malha existente devem ser comparadas caso a caso. A liquefação ou a expansão de gasodutos podem ser adequadas em determinadas confi-gurações, entretanto não constituem soluções universais para o aproveitamento sustentável dos resíduos.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O biometano pode integrar o tratamento de resíduos agroindustriais à transição energé-tica brasileira quando sua produção se articula com demanda efetiva e controle ambiental. A revisão dos fundamentos mostra que a digestão anaeróbia, a limpeza do gás e a purificação formam um sistema cujas etapas precisam ser compatíveis entre si. A disponibilidade de biomassa representa o início dessa avaliação; o desempenho depende também da estabilida-de operacional, das utilidades, da logística e do destino dos coprodutos.

O caso-experiência de Narandiba evidencia uma alternativa de conexão entre resíduos sucroenergéticos e consumo industrial regional. O balanço ilustrativo, apresentado de forma independente, demonstra a necessidade de distinguir vazão de biometano, metano recupera-do e conteúdo energético. A análise de perdas reforça que qualidade comercial e vantagem climática são dimensões diferentes: um produto conforme pode ser obtido em uma cadeia cujo desempenho ambiental ainda demande melhoria.

A contribuição sustentável do biometano exige reduzir emissões de CH_4, manejar o di-gestato segundo critérios agronômicos e avaliar os efeitos territoriais da atividade. A expan-são deve priorizar configurações que aproveitem recursos e infraestrutura existentes, com monitoramento e contratos coerentes com a disponibilidade dos resíduos. Por seu caráter narrativo e pelo uso de cálculos hipotéticos, este capítulo oferece critérios de análise e não uma certificação de viabilidade de projetos. Sua conclusão é que a descarbonização precisa ser demonstrada pelo desempenho da cadeia completa, com benefícios energéticos e ambien-tais verificáveis.

REFERÊNCIAS

ANP — AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍ-VEIS. Biometano. [S. l.]: ANP, 2026a. Atualizado em: 9 set. 2026. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biometano. Acesso em: 27 set. 2026.

ANP — AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍ-VEIS. Combustível do Futuro: ANP aprova duas resoluções para regulamentação da Lei. [S. l.]: ANP, 2026b. Atualizado em: 4 mar. 2026. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/combustivel-do-futuro-anp-aprova-duas-resolucoes-para-regulamentacao-da-lei. Acesso em: 27 set. 2026.

ANGELIDAKI, I. et al. Biogas upgrading and utilization: current status and perspectives. Biotechnology Advances, v. 36, n. 2, p. 452–466, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011.

BAKKALOGLU, S.; COOPER, J.; HAWKES, A. Methane emissions along biomethane and biogas supply chains are underestimated. One Earth, v. 5, n. 6, p. 724–736, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.05.012.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da Repú-blica, 2017. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13576.htm. Acesso em: 27 set. 2026.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e institui programas nacionais relativos a combustíveis susten-táveis e à descarbonização do gás natural, entre outras disposições. Brasília, DF: Presidência da República, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14993.htm. Acesso em: 27 set. 2026.

CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAMER, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: a re-view. Bioresource Technology, v. 99, n. 10, p. 4044–4064, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057.

COCAL. Cocal e GasBrasiliano iniciam operação da primeira rede de gasoduto exclusi-va para transporte de biometano do Brasil, que começa atendendo a região de Presiden-te Prudente. [S. l.]: Cocal, 6 fev. 2023. Disponível em: https://www.cocal.com.br/noticias/cocal-e-gasbrasiliano-iniciam-operacao-da-primeira-rede-de-gasoduto-exclusiva-para-transporte-de-biometano-do-brasil-que-comeca-atendendo-a-regiao-de-presidente-prudente/. Acesso em: 27 set. 2026.

COCAL. Planta da Cocal em Narandiba/SP é premiada como a melhor durante Fórum Mundial do Biogás. [S. l.]: Cocal, 16 jul. 2024. Disponível em: https://www.cocal.com.br/noticias/biometano/planta-da-cocal-em-narandiba-sp-e-premiada-como-a-melhor-durante-forum-mundial-do-biogas/. Acesso em: 27 set. 2026.

EPE — EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; CIBIOGÁS — CENTRO INTERNA-CIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. Panorama do biometano: setor sucroenergéti-co. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/panorama-do-biometano-setor-sucroenergetico. Acesso em: 27 set. 2026.

IEA — INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Outlook for biogas and biomethane. Pa-ris: IEA, 2025. Disponível em: https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane. Acesso em: 27 set. 2026.

IPCC — INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univer-sity Press, 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/. Acesso em: 27 set. 2026.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do (ed. téc.). Fundamentos da diges-tão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. 2. ed. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2022. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1141618. Acesso em: 27 set. 2026.

MÖLLER, K.; MÜLLER, T. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: a review. Engineering in Life Sciences, v. 12, n. 3, p. 242–257, 2012. DOI: https://doi.org/10.1002/elsc.201100085.

NKOA, R. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. Agronomy for Sustainable Development, v. 34, p. 473–492, 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/s13593-013-0196-z.

OLCZAK, M. et al. Majority of methane emissions from European biogas plant supply chains could be eliminated at no net cost. Communications Sustainability, v. 1, art. 88, 2026. DOI: https://doi.org/10.1038/s44458-026-00065-3.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. Biomass and Bioenergy, v. 35, n. 5, p. 1633–1645, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.033.

WARD, A. J.; HOBBS, P. J.; HOLLIMAN, P. J.; JONES, D. L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. Bioresource Technology, v. 99, n. 17, p. 7928–7940, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044.

WEILAND, P. Biogas production: current state and perspectives. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 85, n. 4, p. 849–860, 2010. DOI: https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7.

Capítulo 25

10.37423/260911450

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL E PROJETO DOS SISTEMAS HIDRÁULICO E ELÉTRICO DE UMA PLATAFORMA DE ELEVAÇÃO VERTICAL PARA CADEIRANTES

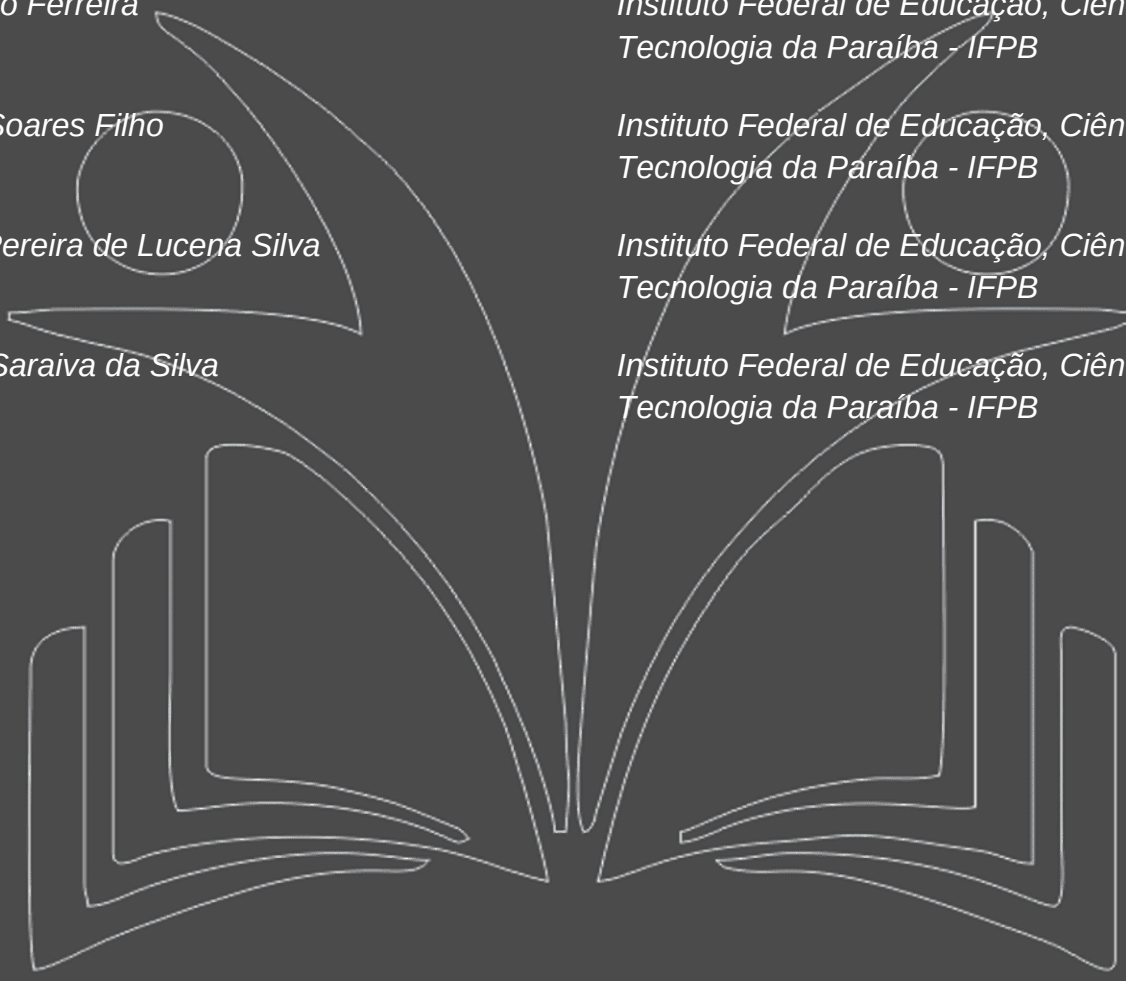
Diodato Ferreira Das Neves Neto — *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB*

Luan Cosmo Ferreira — *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB*

Martiliano Soares Filho — *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB*

Leonardo Pereira de Lucena Silva — *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB*

Edleusom Saraiva da Silva — *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB*



RESUMO

Garantir a autonomia e a inclusão de pessoas com mobilidade reduzida ainda é um desafio prático no Brasil, onde barreiras arquitetônicas e o alto custo de equipamentos limitam a aplicação real das normas de acessibilidade. Como alternativa viável e segura, apresenta-se o projeto de otimização de uma plataforma de elevação vertical de cabine aberta. A estrutura em aço A-36 foi modelada no Autodesk Inventor 2024 e teve seus perfis formados a frio dimensionados no software DimPerfil, aplicando o Método das Larguras Efetivas. Além da análise estrutural, projetou-se o circuito óleo-hidráulico de elevação e o sistema elétrico de comando. O movimento de subida é acionado por um motor trifásico de 2 CV controlado por um inversor de frequência WEG CFW 100, permitindo acelerações e desacelerações suaves, enquanto a descida é regulada por uma válvula solenoide que controla o retorno do óleo. A segurança operacional é garantida por um painel com manipulador joystick, chaves de fim de curso para limitação do percurso e botão de emergência. A otimização resultou na redução de 46 kg de aço na estrutura sem comprometer a rigidez, atendendo aos fatores de segurança normativos. O projeto demonstra a viabilidade técnica do equipamento e fornece um modelo replicável para a fabricação de tecnologias assistivas de baixo custo.

Palavras-chave: acessibilidade, plataforma de elevação, sistema hidráulico, análise estrutural, otimização.

1 INTRODUÇÃO

A garantia de mobilidade para pessoas com deficiência ou restrições motoras não é apenas uma diretriz arquitetônica, mas uma condição indispensável para a inclusão social. No Brasil, embora a Constituição Federal de 1988 e a Lei Brasileira de Inclusão nº 13.146/2015 assegurem o direito à acessibilidade e à eliminação de barreiras, a aplicação prática dessas leis esbarra em desafios econômicos e de infraestrutura (Brasil, 1988, 2015). Dados da pesquisa Nacional de Amostra de Domicílios Contínua (PNAD Contínua) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) indicam que mais de 18,6 milhões de brasileiros possuem algum grau de deficiência, totalizando 8,9% da população com 2 anos ou mais (IBGE, 2024). No cenário internacional, estimativas da Organização Mundial da Saúde (OMS) e do Fundo das Nações Unidas para Infância (UNICEF) apontam que quase 1 bilhão de pessoas no mundo não têm acesso aos dispositivos assistivos de que necessitam, sendo um quadro especialmente crítico em países em desenvolvimento (ONU Brasil, 2022).

Contudo, as iniciativas vigentes ainda se mostram insuficientes para assegurar a plena inclusão. A limitação de recursos públicos e a presença de barreiras culturais e arquitetônicas continuam restringindo o acesso à educação, ao trabalho e ao convívio comunitário (Senado Federal, 2024). Na mesma linha, ao analisarem a execução do Programa Viver sem Limites, Borges et al. (2021) constataram a permanência de severos obstáculos estruturais e sociais, evidenciando que as políticas públicas atuais ainda não garantem o exercício efetivo dos direitos fundamentais dessa população.

Um dos principais obstáculos para a adequação de edificações existentes é o alto custo de elevadores enclausurados convencionais e plataformas comerciais (Oliveira, 2017, 2020). Conforme a NBR 9050 (ABNT, 2020), muitas vezes, esses equipamentos exigem reformas estruturais profundas e investimentos inviáveis para residências, edifícios públicos ou pequenas instituições. Diante dessa realidade, este trabalho foi desenvolvido para projetar e otimizar uma plataforma de elevação vertical acessível, segura e de menor custo, utilizando a modelagem tridimensional e a simulação computacional para validar a estrutura e os sistemas antes da fabricação.

O projeto tomou como ponto de partida a plataforma com acionamento por fuso originalmente concebida por França (2023), buscando aprimorar sua estrutura e seu desempenho operacional. Para isso, realizou-se a modelagem e a análise estrutural detalhada no Autodesk Inventor 2024, combinada ao uso do software DimPerfil para a otimização dos perfis de aço formados a frio. Com o intuito de elevar os níveis de segurança e a eficiência do equipamento, o acionamento mecânico por fuso foi

substituído por um sistema hidráulico. Nesse novo mecanismo, o movimento de subida é impulsionado por uma central hidráulica acionada por motor elétrico com inversor de frequência, enquanto a descida é regulada por uma válvula solenoide que controla o retorno do óleo ao reservatório. O estudo abrangeu também a análise e o dimensionamento preliminar dos circuitos hidráulico e elétrico, essenciais para a seleção da bomba, dos componentes de proteção e dos elementos de comando.

Nesse sentido, este capítulo apresenta o projeto do equipamento, dimensionado para vencer desníveis de até 1,0 m com carga nominal de 250 kg. A integração entre a otimização estrutural e os sistemas hidráulico e elétrico foi realizada em conformidade com as normas NBR ISO 9386-1 (ABNT, 2013) e NBR 14762 (ABNT, 2010). O texto está organizado em fundamentação teórica e normativa, procedimentos metodológicos, apresentação e discussão dos resultados e considerações finais.

Nota editorial: Este capítulo de livro apresenta uma versão ampliada e integrada da pesquisa de Trabalho de Conclusão de Curso, cujos resultados parciais voltados à otimização estrutural foram sintetizados e apresentados no 25º CONEMI (Neto e Ferreira, 2025; Ferreira et al., 2025).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar e aprimorar o projeto de uma plataforma de elevação vertical voltada a pessoas com mobilidade reduzida, integrando a otimização de sua estrutura metálica ao dimensionamento de seus sistemas hidráulico e elétrico de comando.

1.1.2 Objetivos específicos

- Definir os parâmetros normativos de carga, dimensões e segurança do equipamento;
- Modelar e analisar a estrutura em 3D, utilizando o Autodesk Inventor 2024;
- Otimizar os perfis de aço, no software DimPerfil, para redução de massa;
- Dimensionar os circuitos hidráulico e elétrico, para garantir um acionamento seguro;
- Avaliar a viabilidade técnica e econômica do projeto final.

1.2 Justificativas

Considerando que a inclusão social de pessoas com deficiência é um direito fundamental assegurado por leis, mas que, na prática, as ações atuais ainda não têm sido suficientes para garantir acessibilidade plena a esses indivíduos e, levando em conta que milhões de pessoas em todo o mundo dependem de recursos assistivos para sua mobilidade e integração social; destaca-se a relevância do desenvolvimento de equipamentos que possam oferecer suporte a essas pessoas com custos mais acessíveis. Soma-se a isso a importância do uso de simulação computacional, que permite otimizar projetos, antecipar e corrigir falhas antes da fabricação, além de assegurar que tais projetos atendam rigorosamente às normas técnicas vigentes. Dessa forma, este trabalho busca contribuir para ampliar a acessibilidade de forma segura, funcional e economicamente viável.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Requisitos Normativos de Acessibilidade e Segurança

O desenvolvimento de plataformas de elevação vertical exige o cumprimento de diretrizes regulatórias e técnicas para garantir a integridade do usuário e a funcionalidade do equipamento (ABNT, 2013). No Brasil, os critérios fundamentais de acessibilidade em edificações e mobiliários urbanos são estabelecidos pela NBR 9050 (ABNT, 2020), que define os parâmetros antropométricos, as dimensões mínimas de cabine e os espaços necessários para a manobra segura de cadeiras de rodas.

No âmbito do projeto mecânico e estrutural, a norma que rege o equipamento é a NBR ISO 9386-1 (ABNT, 2013), específica para plataformas de elevação vertical motorizadas destinadas a pessoas com mobilidade reduzida. A norma estipula que a estrutura deve suportar uma carga nominal mínima de 250 kg, distribuída de forma crítica para simular a condição real de operação. Além disso, estabelece limites para as velocidades de subida e descida e exige um Fator de Segurança (FS) mínimo de 1,6 para todos os componentes submetidos a cargas dinâmicas, calculado com base na resistência à deformação permanente do material.

Para os equipamentos de transporte vertical em pequenas edificações, a norma NBR 12892 (ABNT, 2022) serve como referência complementar para a comparação entre elevadores enclausurados convencionais e plataformas de cabine aberta. Enquanto os elevadores convencionais exigem poços profundos e caixas de corrida fechadas, as plataformas de cabine aberta projetadas segundo a NBR ISO

9386-1 (ABNT, 2013) representam uma alternativa de menor custo, menor impacto estrutural no imóvel e manutenção simplificada.

A especificação dos componentes estruturais apoia-se em normas complementares de padronização mecânica. A geometria dos perfis de aço ASTM A-36 (ASTM, 2001), como a cantoneira de abas iguais, o perfil U simples e o perfil U enrijecido (Ue), seguem a NBR 6355 (ABNT, 2012) e são mostrados na Figura 1. Esses perfis são formados à frio, conforme a NBR 6355, produzidos por meio de processos de dobramento em prensas dobradeiras ou conformação contínua em matrizes rotativas, utilizando bobinas laminadas a frio ou a quente, com ou sem revestimento, realizados em temperatura ambiente (ABNT, 2012).

Já o direcionamento da cabine móvel sobre a estrutura fixa utiliza guias metálicos do tipo T, conforme exibe a Figura 2. São padronizados pela norma internacional ISO 7465 (ISO, 2007), assegurando o alinhamento adequado e o deslizamento suave das corrediças de nylon.

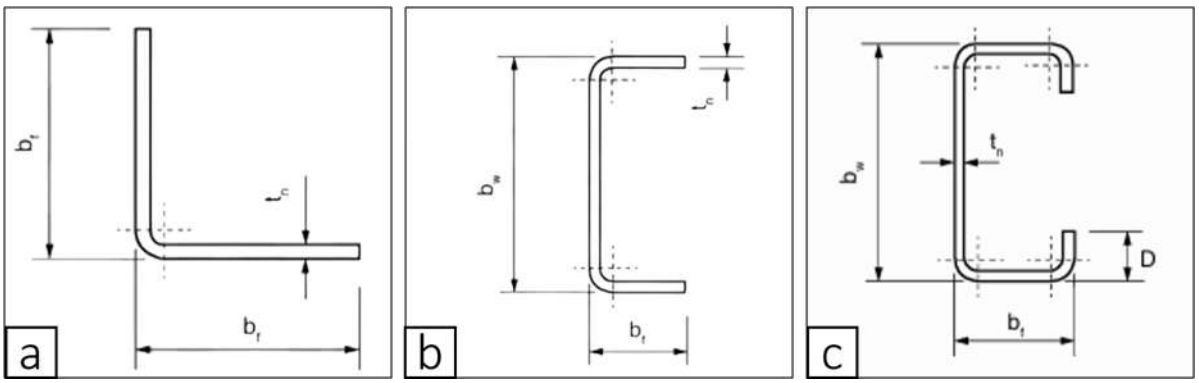
As propriedades mecânicas do aço ASTM A-36 encontram-se na Tabela 1.

TABELA 1. Requisitos de resistência à tração

Chapas, Perfis e Barras:		
Resistência à tração	58-80 ksi	400-500 MPa
Limite de escoamento, mín	36 ksi	250 MPa
Chapas e Barras:		
Alongamento em 8 pol. [200 mm], mín.	20%	
Alongamento em 2 pol. [50 mm], mín.	23%	
Perfis:		
Alongamento em 8 pol. [200 mm], mín.	20%	
Alongamento em 2 pol. [50 mm], mín.	21%	

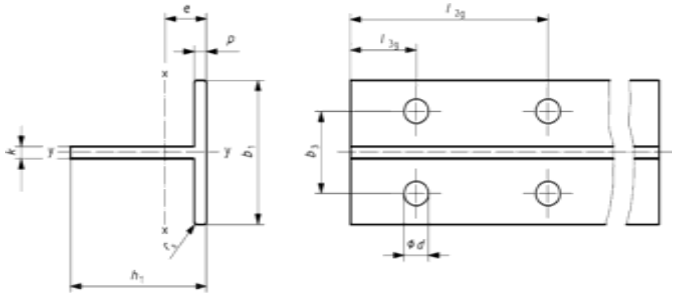
Fonte: ASTM (2001).

FIGURA 1. Perfis utilizados: a) cantoneira de abas iguais (L); b) U simples (U); c) U enrijecido (Ue)



Fonte: Adaptado de NBR 6355 (ABNT, 2012).

FIGURA 2. Perfil T utilizado para guia da estrutura



Fonte: ISO 7465 (ISO, 2007).

2.2 Dimensionamento de Perfis de Aço Formados a Frio e Critérios de Segurança

O dimensionamento de elementos constituídos por perfis de aço formados a frio (PFF) fundamenta-se na verificação dos Estados Limites Últimos (ELU), definidos como a condição limite de resistência a partir da qual a estrutura deixa de cumprir sua função de forma segura por escoamento do material, plastificação ou colapso decorrente de instabilidades mecânicas, o que pode levar a acidentes e perdas materiais Sanchez (2022). No Brasil, os critérios de cálculo e verificação de capacidade resistente dessas seções são regulamentados pela norma NBR 14762 (ABNT, 2010).

Devido às reduzidas espessuras de parede características dos perfis formados a frio, os elementos submetidos à compressão ou à flexocompressão apresentam elevada suscetibilidade a fenômenos de instabilidade local, global e por distorção da seção transversal antes de atingirem a tensão de escoamento do material. Para contabilizar a perda de capacidade resistente decorrente dessas instabilidades, a NBR 14762 estabelece como metodologia fundamental o Método das Larguras Efetivas (MLE). Esse método aplica uma redução teórica na largura útil das lâminas comprimidas, determinando uma seção eficaz capaz de suportar os esforços solicitantes sem sofrer colapso prévio por flambagem (Silva, 2018; ABNT, 2010).

Conforme Beer et al. (2019) e Hibbeler (2019), os elementos estruturais encontram-se frequentemente submetidos a esforços combinados na mecânica dos sólidos. A flexão composta (fcomp) ocorre quando um membro é solicitado pela atuação simultânea de forças normais (Nd) e momentos fletores em suas direções principais (Mxd e Myd). A avaliação da segurança fundamenta-se em equações de interação que relacionam esses esforços solicitantes às respectivas capacidades resistentes do perfil, considerando também os efeitos do esforço cortante (Vd) segundo as diretrizes da norma NBR 14762 (ABNT, 2010).

A capacidade resistente de um perfil é interpretada numericamente em uma escala adimensional entre 0 (0% de utilização) e 1 (100% de utilização da capacidade do perfil) (Jacob, 2020). Contudo, o Fator de Segurança (FS) é conceituado como a razão entre a tensão de ruptura ou carga limite e a tensão ou carga admissível de projeto. Quando normas técnicas específicas para transporte vertical de pessoas, como a NBR ISO 9386-1 exigem um Fator de Segurança mínimo de 1,6 para todos os componentes do equipamento sob carga dinâmica, a taxa máxima de utilização por flexão composta (fcomp_lim) ajusta-se à relação entre o valor unitário máximo de aprovação e o fator normativo, conforme mostra a Equação (1) (ABNT, 2013; Neto E Ferreira, 2025).

$$f_{com_lim} = \frac{1}{FS} = \frac{1}{1.6} = 0{,}625 \qquad (1)$$

Dessa forma, qualquer perfil estrutural que apresente um valor de flexão composta (fcomp) superior ao limite de 0,625 é considerado reprovado, garantindo que a estrutura opere estritamente no regime elástico de deformação e prevenindo o surgimento de deformações permanentes sob condições normais de operação.

2.3 Fundamentos dos Sistemas Óleo-Hidráulicos e Comandos de Automação

A hidráulica é a ciência voltada ao estudo das propriedades e do comportamento físico dos fluidos em estado de repouso ou em movimento (Azevedo Netto et al., 2015; Fialho, 2018). No âmbito da engenharia mecânica, a hidráulica divide-se entre a hidráulica teórica, composta pela hidrostática, hidrocinemática e hidrodinâmica, e a hidráulica aplicada ou hidrotécnica, focada no aproveitamento prático do escoamento sob pressão (Azevedo Netto et al., 2015).

Nos sistemas de transmissão de potência, a óleo-hidráulica emprega fluidos praticamente incompressíveis para transferir energia e gerar trabalho mecânico controlado. Essa tecnologia destaca-se pela elevada densidade de potência, flexibilidade de montagem em espaços reduzidos, movimentos suaves sem folgas residuais e capacidade de auto lubrificação contínua dos componentes internos (Fialho, 2018).

De acordo com Fialho (2018), a estrutura funcional de um circuito óleo-hidráulico organiza-se em três estágios interdependentes:

- Geração de Energia: Etapa em que um motor primário (geralmente elétrico) aciona bombas de deslocamento positivo, convertendo energia mecânica em energia hidráulica na forma de pressão e vazão;

- Distribuição e Controle: Conjunto de válvulas direcionais, reguladoras de pressão e controladoras de fluxo que modulam o comportamento do fluido no circuito;

- Aplicação de Energia: Etapa efetuada por atuadores mecânicos, como os cilindros lineares de simples ou dupla ação, que convertem a energia hidráulica pressurizada de volta em trabalho mecânico útil.

Os sistemas hidráulicos possuem diversas vantagens em relação aos mecânicos e elétricos. Sua instalação é fácil e flexível, inclusive em espaços reduzidos, algo que os sistemas mecânicos não oferecem. Devido à baixa inércia, permitem inversões de movimento rápidas e suaves, além de ajustes micrométricos de velocidade, enquanto os sistemas mecânicos e elétricos possuem ajustes escalonados, mais complexos e onerosos. Além disso, são auto lubrificados, ao contrário dos outros sistemas, e apresentam uma relação peso, tamanho e potência consumida muito menor. Também possuem fácil proteção e, graças à excelente condutividade térmica do óleo, o próprio reservatório muitas vezes dispensa o uso de trocadores de calor (Fialho, 2018).

Ainda de acordo com Fialho (2018), os sistemas hidráulicos apresentam algumas desvantagens em comparação aos mecânicos e elétricos. O custo inicial é elevado, e a conversão de energia elétrica em mecânica, depois para hidráulica e novamente para mecânica resulta em perdas de eficiência. Além disso, há perdas por vazamentos e atritos internos e externos, o que reduz ainda mais o rendimento do sistema. Outro ponto crítico é o risco de incêndio, já que o óleo utilizado é inflamável.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Otimização estrutural de plataforma de elevação

Neste trabalho foi otimizado um modelo de plataforma de elevação vertical, inicialmente idealizado por França (2023), que fez apenas a modelagem 3D e construção parcial da estrutura.

A otimização consiste na realização de uma análise estrutural, simulando a aplicação de forças nos pontos críticos que representam a condição mais desfavorável, considerando a carga máxima que a

estrutura suportará. Em seguida, os perfis que a compõem são examinados individualmente, com o objetivo de aprimorar seu desempenho, avaliando a viabilidade de substituí-los por perfis de menor dimensão. Essa abordagem visa aumentar a eficiência e reduzir os custos do projeto.

Como parte das melhorias, o sistema de acionamento foi substituído de fuso para hidráulico, pois apesar das vantagens do acionamento por fuso, como o baixo custo de manutenção, destacado por Oliveira (2017), o autor também destaca que o uso de dois fusos exige um alto nível de sincronização na rotação, o que pode ser solicitado devido a folgas nas extensões, imprecisões nas castanhas ou desalinhamentos durante a montagem. Além disso, embora o sistema de fuso possua um menor número de componentes na transmissão, seu funcionamento apresenta maior complexidade.

Dessa maneira, optou-se por um sistema hidráulico, mais adequado ao projeto em comparação aos mecanismos operados por fuso, por não apresentar suas desvantagens e também, em relação às plataformas operadas por cabos. Como a plataforma de elevação tem a finalidade de superar desníveis, e não de conectar múltiplos andares, um elevador de cabos, que frequentemente requer uma casa de máquinas, seria uma solução mais complexa e menos apropriada. Já os elevadores hidráulicos, conforme destacado por Guedes (2017), dispensam essa exigência, otimizando o espaço do poço do elevador. Além disso, a carga é distribuída pelas calhas de suporte da cabine, eliminando a necessidade de uma estrutura adicional no topo da edificação. Outro benefício relevante é o menor custo de instalação em comparação aos sistemas de tração convencionais.

3.2 Dimensionamento Analítico do Atuador e Dinâmica do Fluido

O projeto mecânico do cilindro hidráulico baseia-se no equilíbrio de forças e na resistência dos materiais. Para um atuador linear de simples ação responsável pela elevação da plataforma móvel, o diâmetro mínimo do pistão (Dp) é determinado pela relação entre a força axial total solicitante (Fa), que engloba a carga útil, a massa da cabine, as forças dinâmicas e a pressão efetiva de trabalho do sistema (Ptb), conforme mostra a Equação (2) (Fialho 2018).

$$\nu_p - \frac{\sqrt{4.F_a}}{\pi.P_{\tau o}} \qquad (2)$$

A P_{tb} considera a pressão nominal da bomba (Pn) descontadas as perdas de carga estimadas nas tubulações e conexões do circuito, como mostrado na a Equação (3) (Fialho, 2018).

$$P_{tb} = (P_n - 0{,}15.P_n) \quad (3)$$

Adicionalmente, por se tratar de um elemento comprimido com elevado comprimento de haste, deve-se obrigatoriamente verificar a estabilidade elástica contra a flambagem. Segundo a formulação clássica de Euler, a carga crítica de flambagem (K) para a haste circular de diâmetro (Dh) é calculada pela a Equação (4) (Fialho, 2018).

$$K = \frac{\pi^2}{\lambda^2}.E.J \quad (4)$$

Em que E representa o módulo de elasticidade do aço da haste, J é o momento de inércia da seção transversal circular, encontrado pela Equação (5) e λ, o comprimento livre de flambagem. A carga admissível de trabalho (Fa) deve assegurar um fator de segurança à flambagem (S) adequado, como mostra a Equação 6, prevenindo a vinculação lateral e a falha catastrófica da haste durante o curso de elevação (BEER et al., 2019).

$$J = \frac{\pi.D_h^4}{64} \quad (5)$$

$$F_s = \frac{K}{S} \quad (6)$$

A dinâmica de movimentação vincula-se à vazão requerida (Q) para acionar o atuador no tempo previsto. Sabendo que a velocidade linear de subida (v) depende do curso útil de elevação (Lh) e do intervalo de tempo desejado (Δt), a Q é expressa pela Equação (7), onde Ap é a área transversal do pistão.

$$Q = \frac{L_h}{\Delta_t}.\frac{\pi.D_r^2}{4} \rightarrow Q = \frac{v}{A_p} \quad (7)$$

$$Q = v.A_p \quad (8)$$

Em conformidade com a norma NBR ISO 9386-1 (ABNT, 2013), a velocidade nominal de deslocamento da plataforma não deve exceder o limite de 0,15 m/s, garantindo o conforto antropométrico e a segurança do usuário durante o trajeto.

Para garantir a integridade física dos ocupantes, a NBR ISO 9386-1 estabelece requisitos de segurança nos circuitos hidráulicos de acessibilidade (ABNT, 2013). Entre eles, destacam-se a instalação de uma válvula limitadora de pressão (alívio) para impedir sobrecargas mecânicas; uma válvula antiqueda (retenção pilotada) montada diretamente no pórtico do cilindro para bloquear a descida inopinada em caso de despressurização ou ruptura da tubulação; e um dispositivo de descida manual de emergência, operável sem energia elétrica (ABNT, 2013; Fialho, 2018).

A integração do circuito hidráulico ao sistema de automação é intermediada por comandos eletroeletrônicos. O emprego de chaves fim de curso eletromecânicas possibilita o desligamento automático do motor ao atingir os patamares limite (Fialho, 2018). Ademais, a utilização de inversores de frequência para o acionamento do motor trifásico possibilita a modulação da velocidade da bomba por meio de rampas progressivas de aceleração e desaceleração. Essa estratégia suprime as variações bruscas de movimento nos momentos de partida e parada, garantindo maior estabilidade e conforto ao usuário (Neto e Ferreira, 2025).

3.3 Características dimensionais e normativas do trabalho

Neste projeto foi seguida a norma NBR ISO 9386-1 (ABNT, 2013). A escolha se justifica pela sua especificidade e adequação às características do equipamento proposto, visto que ela abrange plataformas de elevação verticais motorizadas, incluindo diretrizes específicas para elevadores e plataformas de elevação hidráulicas.

Na Tabela 2 são apresentadas características dimensionais da plataforma de elevação que é otimizada no projeto.

TABELA 2. Características dimensionais e normativas do trabalho

Carga nominal mínima [kg]	250
Percurso máximo [m]	1
Dimensões mínimas do piso interno [mm]	800 x 1250
Velocidade nominal máxima [m/s]	0,15
Tipo de acionamento	Hidráulico
Mecanismo de acionamento	Motor elétrico acionado por inversor de frequência

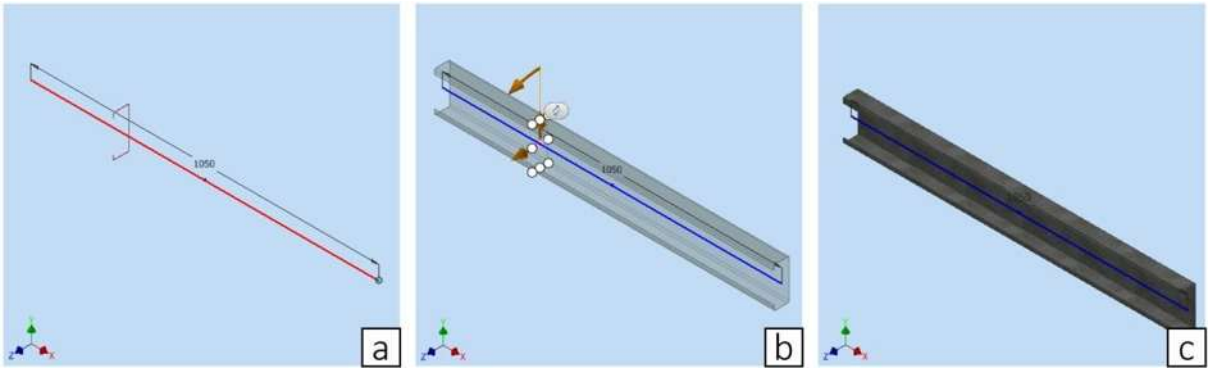
Fonte: Autoria própria (2025).

3.4 Modelagem 3D com Gerador de Estruturas

Na modelagem 3D com gerador de estruturas, inicialmente, é gerada uma peça chamada esqueleto, que serve como base para a estrutura. Sempre que a geometria original sofre alterações, a peça esqueleto é automaticamente atualizada, ajustando o tamanho ou a posição dos membros da estrutura. Neste projeto, os perfis estruturais foram criados e publicados na biblioteca do Autodesk Inventor.

Na Figura 3, observa-se a seleção de linhas, arestas e pontos, elementos utilizados como base para a criação da estrutura. Nela está apresentada a peça resultante, gerada através do Gerador de Estruturas, com o tipo de perfil previamente selecionado e exportado para a biblioteca, sendo este do tipo U enrijecido.

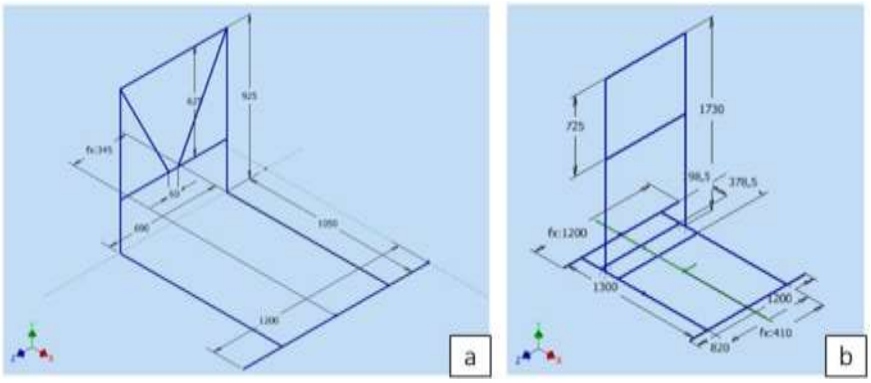
FIGURA 3. Processo de geração de estrutura: a) linhas, arestas e pontos, b) geração da peça, a partir das linhas, arestas e pontos e c) peça resultante



Fonte: Autor (2025).

Após a obtenção de todas as dimensões da plataforma, deu-se início à criação do modelo tridimensional, cuja geometria baseada apenas em linhas e pontos encontra-se ilustrada na Figura 4.

FIGURA 4. Esqueleto da plataforma: a) parte móvel, b) parte fixa

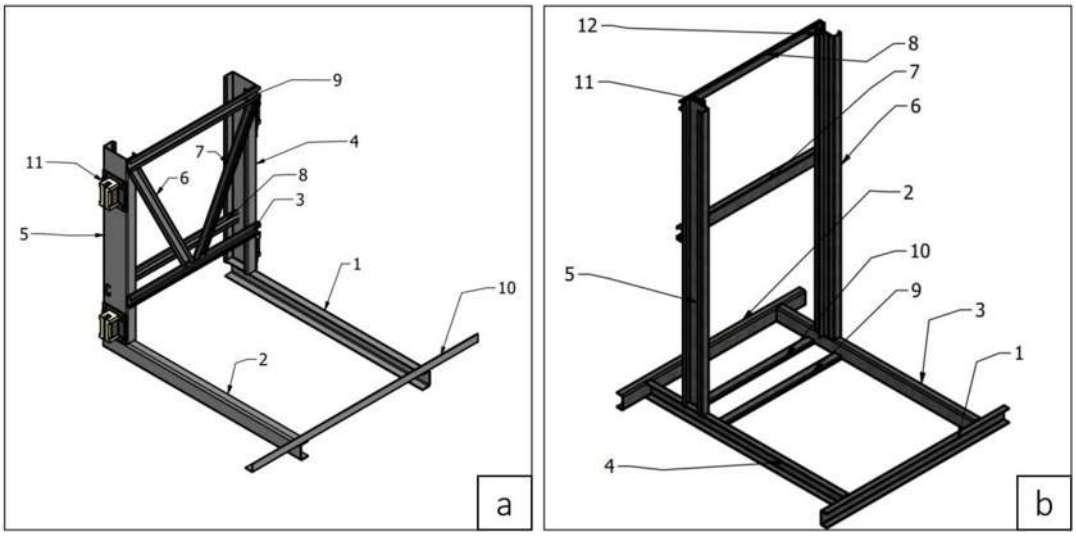


Fonte: Autor (2025).

O processo de inserção dos componentes estruturais foi dividido em três etapas: escolha do perfil do elemento a partir do centro de conteúdo, definição da geometria de posicionamento para a inserção dos membros e, por fim, ajuste da orientação dos elementos.

Na Figura 5, é possível visualizar as estruturas após a inclusão de todos os membros em suas respectivas linhas, com todos os perfis enumerados. A identificação de cada um dos perfis, juntamente com a densidade linear (ρ) e o comprimento de cada um encontram-se na Tabela 3.

FIGURA 5. Plataforma com perfis enumerados: a) plataforma móvel e b) plataforma fixa



Fonte: Autor (2025).

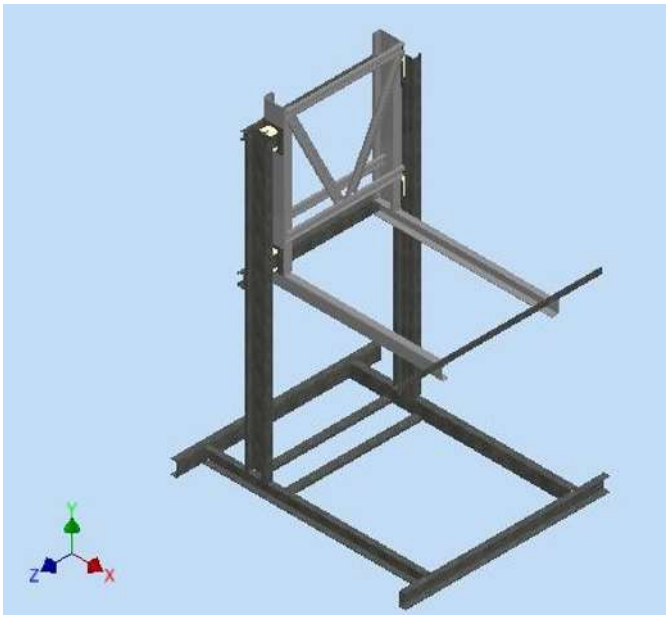
TABELA 3. Tipos de perfil utilizados na plataforma elevatória

Parte	Características			
	Viga	Perfil	ρ [kg/m]	Comprimento Lx [cm]
Móvel	1 e 2	U 75x40x4,75	5,19	105
	4 e 5	Ue 125x50x17x3,00	5,63	85
	3, 8 e 9	Ue 50x25x10x3,00	2,36	69
	6 e 7	Ue 50x25x10x3,00	2,36	66,91
	10	L 40 x 3,00	1,77	120
	11	Corrediça de *nylon*	-	-
Fixa	1 e 2	U 75x40x4,75	5,19	120
	3 e 4	U 75x40x4,75	5,19	130
	5 e 6	Ue 125x50x17x3,00	5,63	173
	7	Ue 75x45x15x3,00	3,89	92
	8	Ue 50x25x10x3,00	2,36	92
	9 e 10	Ue 50x25x10x3,00	2,36	82
	11 e 12	T 31,75x6,20	-	173

Fonte: Autor (2025).

A Figura 6 apresenta a plataforma elevatória completa, na posição onde a parte móvel se encontra na extremidade da parte fixa, na qual é considerada a mais crítica para a plataforma.

FIGURA 6. Plataforma elevatória completa



Fonte: Autor (2025).

3.5 Ambiente de análise estrutural

No ambiente de análise estrutural, o software modela as vigas como elementos lineares e as conexões como vínculos rígidos entre os nós. Destarte, foram definidos os locais de suporte (restrições), os tipos

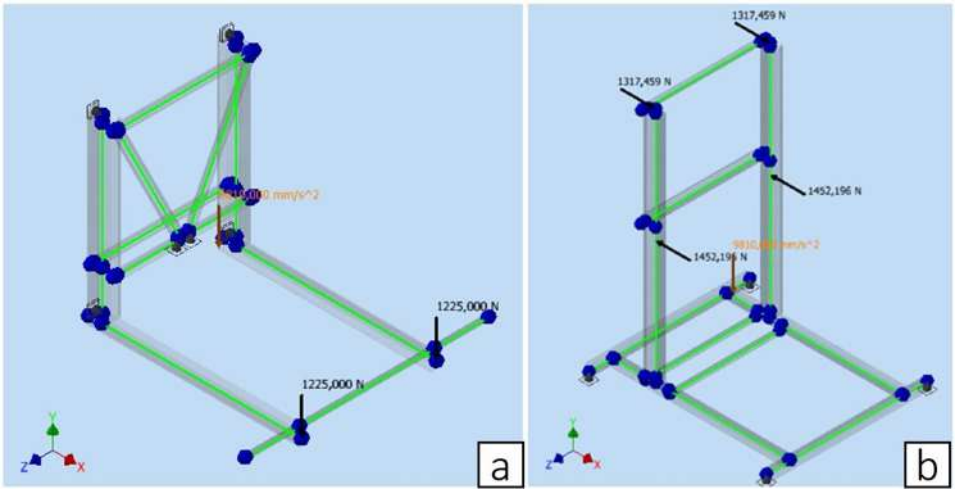
de carga, seus pontos de aplicação e magnitude, bem como as conexões entre as vigas, incluindo a adição de nós ou articulações, quando aplicável. Todas as restrições, cargas e conexões foram criteriosamente estabelecidas para assegurar a conformidade da estrutura com as condições reais de operação, como mostra a Figura 7.

Conforme especificado na norma NBR ISO 9386-1 (ABNT, 2013), a plataforma elevatória deve suportar uma carga mínima de 250 kg. Logo, considerando a aceleração gravitacional de 9,80 m/s², a carga aplicada à estrutura corresponde a 2450 N. Para garantir a avaliação da condição mais crítica, essa carga foi uniformemente distribuída entre as extremidades da parte móvel.

Os apoios das vigas verticais foram modelados como flutuantes, representando as corrediças, e estão submetidos a restrições nos eixos X e Z, permitindo deslocamento exclusivamente ao longo do eixo Y. Por sua vez, os apoios que representam a região de contato entre a estrutura e a região na qual estará situado o mecanismo de acionamento foram especificados como fixos, conferindo liberdade apenas para a rotação.

Na estrutura fixa, foram aplicadas restrições do tipo fixo, assegurando sua estabilidade em relação ao solo. As forças atuantes nos perfis verticais correspondem às reações dos apoios flutuantes que são transmitidas pelas corrediças. Para a análise, considerou-se a condição mais crítica, na qual a parte móvel encontra-se na extremidade superior da parte fixa.

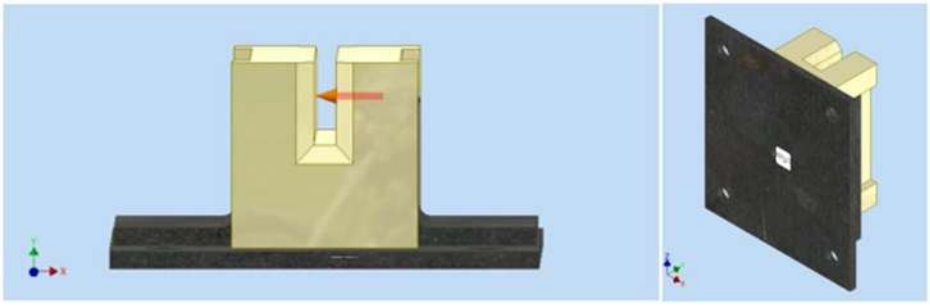
FIGURA 7. Restrições, cargas e conexões necessárias nas partes: a) móvel e b) fixa



Fonte: Autor (2025).

Além disso, é necessário verificar se a corrediça suporta a carga que está sendo transferida por ele, da parte móvel para a parte fixa. Nesse caso deve-se utilizar a Análise de Tensão, pois a corrediça foi modelada pelo método da extrusão e, consequentemente, não foi possível utilizar a análise estrutural. A Figura 8 apresenta a restrição e a força sendo aplicadas na corrediça.

FIGURA 8. Corrediça de nylon no ambiente análise de tensão



Fonte: Autor (2025).

3.6 Análise e otimização dos perfis

A verificação dos perfis otimizados foi realizada utilizando o software DimPerfil, no qual foi feita a verificação do Estado Limite Últimos. É importante destacar que o DimPerfil utiliza a NBR 14762 como base para suas verificações, aplicando especificamente o Método das Larguras Efetivas, um dos quatro métodos previstos pela norma para as verificações de perfis formados a frio (ABNT, 2010).

Após a escolha do perfil, o usuário deve inserir as informações necessárias para que o software realize as verificações. As principais informações são o comprimento e os esforços solicitantes do perfil.

4 RESULTADOS

4.1 Dimensionamento do circuito hidráulico e do comando elétrico

A pressão de 70 bar foi estabelecida como parâmetro para o dimensionamento do cilindro hidráulico. Concluído o cálculo analítico do diâmetro do pistão por meio da Equação (2), selecionou-se um modelo comercial com dimensão padronizada superior à calculada, assegurando a margem operacional do sistema.

A escolha foi feita pela norma ISO 6020-1 (ISO, 2017). Essa norma estabelece as medidas e os padrões para a montagem de cilindros hidráulicos de ação dupla e simples, que operam a uma pres-são de até 160 bar.

A Norma NBR ISO 9386-1 (ABNT, 2013) estabelece que o a carga mínima que o elevador deve suportar não deve ser inferior à 250 kg. Dessa forma, incluindo o peso da estrutura móvel do eleva-dor, determinado pelo software, o cilindro foi dimensionado para uma carga de 281 kgf. Portando, substituindo os valores na Equação (2), considerando a aceleração da gravidade sendo 9,80 m/s2, foi obtido um diâmetro do pistão (Dp) de 24,27 mm.

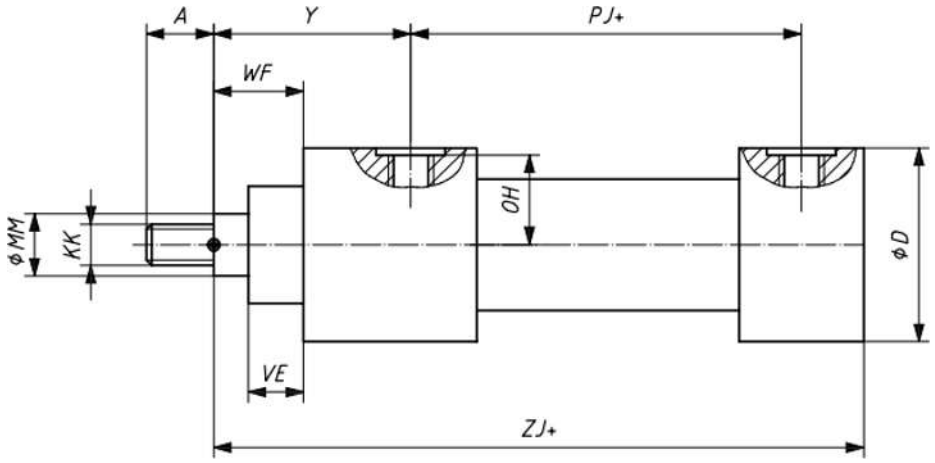
O diâmetro comercial foi selecionado pela Tabela 4 e, segundo as orientações de Fialho (2018) de que o diâmetro comercial do pistão deve ser maior ou igual ao diâmetro do pistão, optou-se por um cilindro com Dp de 25 mm cujo diâmetro da haste (Dh)selecionado é 18 mm. Recalculando a Ptb Equação (3), obteve-se 56,10 bar.

Após o cálculo de deformação por flambagem, utilizando a Equação (4), foi obtido K = 42,72 kN, sendo esta, a força necessária para ocasionar flambagem na haste do cilindro. Por sua vez, a força máxima permissível, calculada pela Equação (6) é Fa = 12206 N. Considerando a aceleração da gravidade 9,80 m/s2, a carga máxima que o cilindro pode elevar é 1245,51 kg, considerando um fator de segurança (S) de 3,5.

Para parâmetro de cálculo, foi estabelecida uma velocidade de subida e descida do cilindro, de 0,12 m/s, que está abaixo do limite máximo permissível pela NBR ISO 9386-1 (ABNT, 2013). Dessa forma, utilizando a Equação (7) e considerando o curso de 1000 mm, obteve-se um tempo de subida do cilindro de 8,33 s. Contudo, considerando a existência de uma rampa de aceleração, na qual a plataforma leva um tempo para atingir sua velocidade máxima de subida, e uma desaceleração próxima ao limite superior, os tempos de subida e descida serão maiores.

Utilizando a Equação (8) para calcular a vazão do pistão, foi encontrada uma Q de 3,53 l/min. A Figura 9 apresenta um modelo de cilindro hidráulico conforme a norma ISO 6020-1 (ISO, 2017), destacando as siglas correspondentes às suas dimensões. A Tabela 4 exibe um trecho da norma com os valores padronizados para as dimensões dos cilindros.

FIGURA 9. Dimensões gerais de cilindros



Fonte: ISO 6020-1 (ISO, 2017).

TABELA 4. Dimensões gerais de cilindros

Pistão [mm]	Haste [mm]	ZJ	KK 6 g	A máx.	Y	PJ	D máx.	OH	VE máx.	WF
	14		M12 x 1,25	16						
25	18	150	M12 x 1,25	16	58	77	56	25,5	15	28
			M14 x 1,5	18						
	18		M14 x 1,5	18						
32	22	170	M14 x 1,5	18	64	89	67	30	19	32
			M16 x 1,5	22						
	22		M16 x 1,5	22						
40	28	190	M16 x 1,5	22	71	97	78	35	19	32
			M20 x 1,5	28						
				⋮						

Fonte: Adaptado de ISO 6020-1 (ISO, 2017).

Para a aplicação das Equações (3) a (7), adotou-se uma carga útil de 250 kg, percurso útil de 1,0 m e velocidade nominal limite de 0,12 m/s, em conformidade com a NBR ISO 9386-1 (ABNT, 2013). Com base nessas formulações analíticas, realizou-se o dimensionamento do atuador hidráulico e a determinação da vazão do sistema. Os parâmetros de projeto e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.

TABELA 5. Parâmetros do cilindro para o projeto

P_n [bar]	70
P_{tb} [bar]	56,10
K [N]	42720
F_a [N]	2753,8
***Famax* [N]**	12206

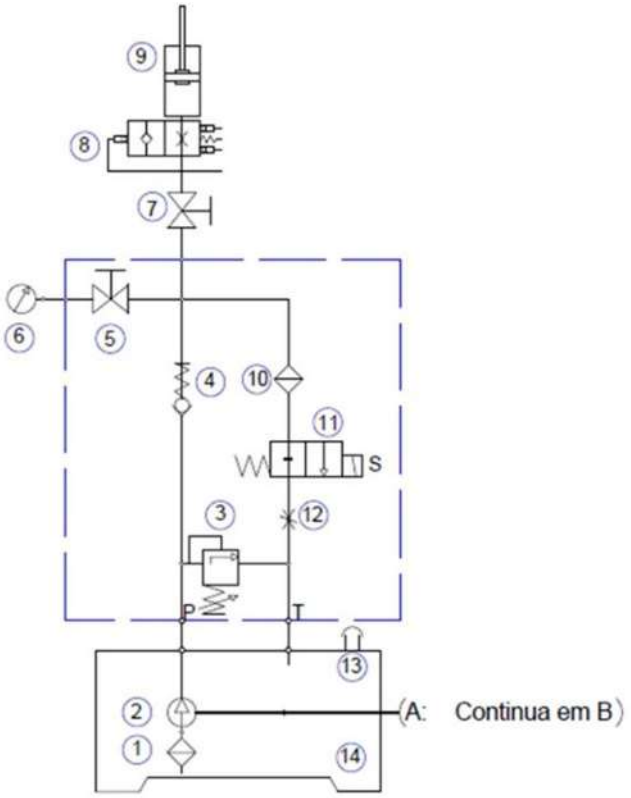
D_p [mm]	25
D_h [mm]	18
v [m/s]	0,12
Δt [s]	8,33
Q [l/min]	3,53

Fonte: Autoria própria (2025).

Analisando os resultados da Tabela 5, verifica-se que a carga crítica de flambagem da haste (K = 42.720N) é expressivamente superior à força axial solicitante (Fa = 2.753,8N) uma razão entre a carga crítica de flambagem e a força solicitante de S = 15,51, muito acima do limite mínimo normativo de 1,6. A vazão calculada de 3,53 L/min definiu a seleção da bomba hidráulica e o ajuste do inversor de frequência.

O processo de esquematização e seleção do circuito óleo-hidráulico do equipamento foi estruturado para assegurar o funcionamento eficiente e seguro da elevação vertical da cabine móvel. Para essa finalidade, adotou-se um atuador linear de simples ação, no qual o fluido hidráulico é succionado do reservatório por meio de um filtro de linha e devidamente pressurizado por uma bomba hidráulica acionada por motor elétrico, conforme mostrado na Figura 10, cujos componentes são descritos na Tabela 6.

FIGURA 10. Diagrama hidráulico de acionamento da plataforma



Fonte: Autoria própria (2025).

TABELA 6. Componentes do circuito hidráulico

Identificação	Dispositivo
1	Filtro na linha de sucção
2	Bomba hidráulica
3	Válvula limitadora de pressão
4	Válvula de retenção
5	Válvula de isoladora de manômetro
6	Manômetro
7	Válvula isoladora
8	Válvula antiqueda
9	Cilindro hidráulico de simples ação
10	Filtro na linha de retorno
11	Válvula de comando de descida
12	Válvula reguladora de fluxo
13	Tampa do tanque
14	Tanque de fluido

Fonte: Autoria própria (2025).

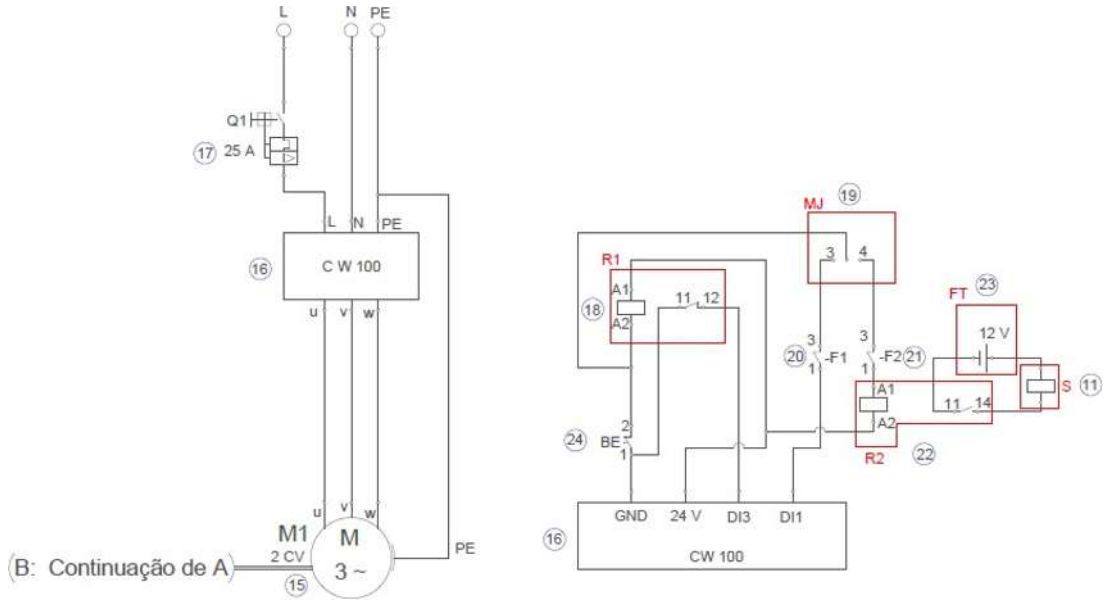
Durante a etapa de subida, o fluido sob pressão é direcionado ao cilindro ao passar por uma válvula de retenção e por uma válvula antiqueda, mantendo-se a pressão máxima do sistema devidamente regulada por uma válvula limitadora calibrada. Por sua vez, a descida da cabine ocorre de forma

controlada por gravidade, sob a ação do peso próprio da estrutura. Esse movimento de retorno ao tanque é regulado por uma válvula solenoide de comando de descida integrada a uma válvula reguladora de fluxo ajustável, o que assegura uma velocidade constante de descida em estrita conformidade com os limites normativos da NBR ISO 9386-1 (ABNT, 2013).

Por fim, o circuito conta com elementos essenciais de proteção e controle, englobando uma válvula isoladora acoplada a um manômetro para a aferição contínua da pressão de trabalho, além de um filtro posicionado na linha de retorno antes da recondução do óleo ao reservatório.

O painel de comando elétrico do equipamento foi concebido para operar em baixa tensão em uma tensão de 12 V, proporcionando maior segurança eletrônica operacional. O sistema é integrado a um inversor de frequência modelo WEG CFW 100, responsável por alimentar e modular a velocidade de um motor elétrico trifásico de 2 CV (1,5 kW). Essa solução técnica possibilita a aplicação de rampas de aceleração e desaceleração progressivas, mitigando picos de inércia e garantindo a suavidade e a estabilidade durante o deslocamento da plataforma. O circuito de comando é apresentado na Figura 11, em continuidade ao circuito de potência exibido na Figura 10, enquanto a especificação de seus componentes é detalhada na Tabela 7.

FIGURA 11. Diagrama elétrico de acionamento da plataforma



Fonte: Autoria própria (2025).

TABELA 7. Descrição dos componentes do circuito elétrico

Identificação	Dispositivo
11	Válvula de comando de descida
15	Motor elétrico, trifásico de 2 cv, pot. de 1471 W,
16	Inversor de frequência CFW 100
17	Disjuntor monofásico 25 A
18	Relé eletromecânico 1
19	Manipulador *joystick*
20	Fim de curso superior
21	Fim de curso inferior
22	Relé eletromecânico 2
23	Alimentação de 12 V
24	Botão de emergência

Fonte: Autoria própria (2025).

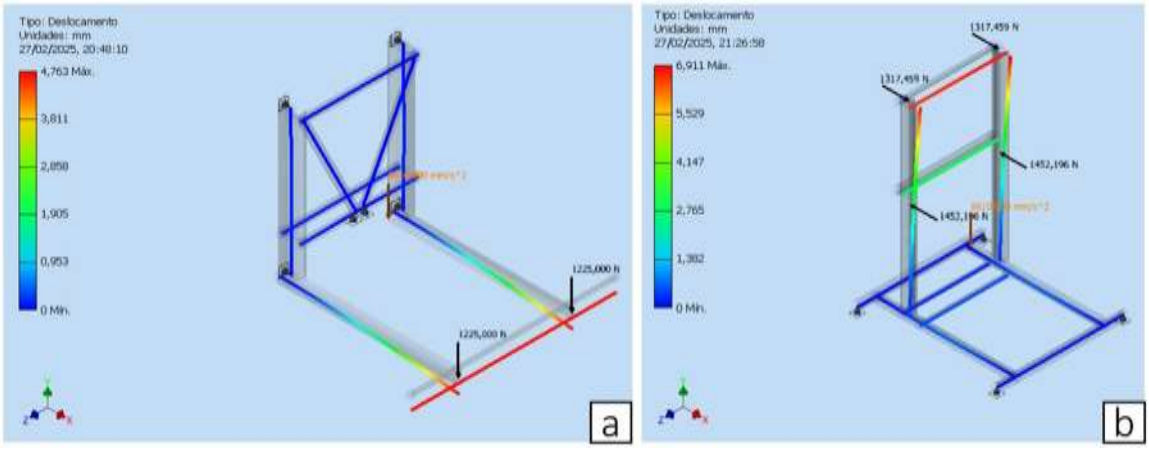
A interface de operação e o controle manual das etapas de subida e descida são executados diretamente na cabine por meio de um manipulador do tipo joystick. Para o monitoramento do posicionamento da estrutura móvel, instalaram-se chaves fim de curso eletromecânicas nos limites superior e inferior da torre fixa, as quais interrompem automaticamente o circuito de comando desenergizando o motor ao atingir o patamar de parada superior e desenergizando a válvula de comando de descida ao atingir o patamar de parada inferior. Adicionalmente, inseriu-se em série no circuito de comando um botão de emergência com retenção, garantindo a desenergização imediata do sistema e o bloqueio hidráulico instantâneo em qualquer ponto do percurso diante de eventuais anormalidades operacionais.

4.2 Análise estrutural

No software Autodesk Inventor 2024, foram desenvolvidos a modelagem tridimensional, a simulação dos esforços aplicados à estrutura e a análise de tensão e deformação. Posteriormente, na ferramenta computacional DimPerfil, procederam-se às verificações dos ELU e a otimização dos perfis, utilizando os dados obtidos na simulação realizada no Inventor.

Após a definição de todas as restrições e a aplicação das cargas necessárias para a simulação, obtém-se inicialmente um dos resultados mais relevantes analisados no Inventor: a deformação máxima (εmáx). A Figura 12 ilustra as deformações na parte móvel e na parte fixa da estrutura.

FIGURA 12. Deformações na estrutura nas partes: a) móvel e b) fixa

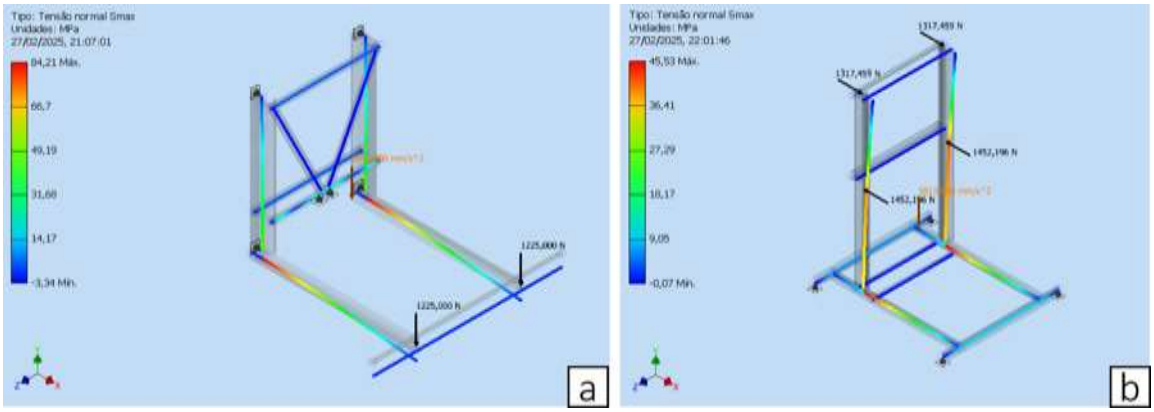


Fonte: Autor (2025).

Nota-se que a εmáx na parte móvel é de 4,76 mm e na parte fixa é de 6,91 mm. A NBR ISO 9386-1 (ABNT, 2013) menciona que a instalação completa da plataforma de elevação deve resistir, sem deformação permanente, às forças impostas durante a operação normal e sob impacto nos batentes, quando viajando à velocidade nominal. Portanto, é permissível deformação local que não afete a operação da plataforma de elevação.

A tensão normal máxima (σmáx) indica o ponto de maior esforço dentro do material. Logo também deve ser observada. Na Figura 13, pode-se verificar a σmáx das partes móvel e fixa da estrutura.

FIGURA 13. Tensões normais na estrutura nas partes: a) móvel e b) fixa



Fonte: Autor (2025).

Destarte, tem-se σmáx é 84,21 MPa na parte móvel (Figura 13a) e 45,53 MPa na parte fixa (Figura 13b). Hibbeler (2019) descreve o FS como um valor numérico utilizado para determinar a carga admissível

em projetos ou análises estruturais. Esse fator representa a razão entre a tensão de ruptura (σrup) e a tensão admissível (σadm).

Destarte, utilizando o limite de escoamento do Aço presente na Tabela 1 e os valores obtidos nas análises, apresentados na Figura 13, obtém-se para a plataforma móvel FS igual a 2,97 e para a plataforma fixa FS igual a 5,49.

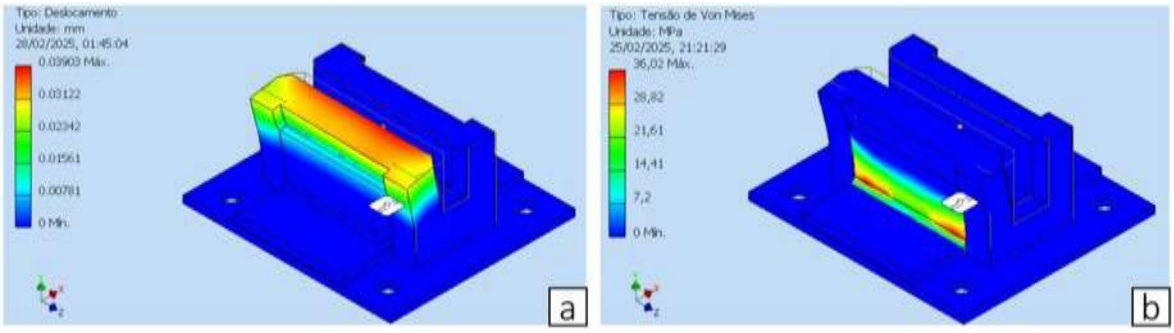
Dessa forma, considera-se que a plataforma elevatória irá suportar os esforços aos quais será submetida, visto que, o menor FS encontrado foi 2,97 e de acordo com a NBR 9386-1 (ABNT, 2013), o FS exigido para todos os componentes do equipamento deve ser de 1,6, calculado com base na resistência à deformação e considerando a máxima carga dinâmica aplicada.

Para verificar se a corrediça suporta a carga que é transferida por ela, da parte móvel para a parte fixa, utilizou-se o método de análise de tensão, e observou-se o seu comportamento com relação a εmax e σmax.

Conforme a Figura 14, os resultados obtidos na simulação foram εmax igual a 0,04 mm e σmáx igual a 36 MPa. O limite de escoamento do nylon presente no Inventor, nas propriedades mecânicas do material é igual a 82,75 MPa e a σmáx obtida é 36,02 MPa. Portanto, o FS para a corrediça de nylon é igual a 2,29, e a εmáx é desprezível pois é considerado igual a 0.

Destarte, considera-se que a corrediça de nylon irá suportar os esforços aos quais será submetida, visto que o FS encontrado foi 2,29, e de acordo com a NBR 9386-1 (ABNT, 2013), o FS mínimo exigido para todos os componentes do equipamento deve ser de 1,6, calculado com base na resistência à deformação e considerando a máxima carga dinâmica aplicada.

FIGURA 14. Ensaios na corrediça: a) Deformação e b) Tensão



Fonte: Autor (2025).

4.3 Otimização dos perfis

O critério de aprovação dos perfis no DimPerfil foi definido com base na Equação (1), estabelecendo a taxa máxima de utilização por flexão composta em fcom_plim = 0,625, correspondente ao Fator de Segurança mínimo de 1,6 exigido pela norma NBR ISO 9386-1 (ABNT, 2013).

Para realizar as verificações de ELU e a otimização, foi necessário obter o comprimento (Lx), esforço normal (Nd), momento em x (Mxd), momento em y (Myd) e o esforço cortante (Vd) de cada perfil formado a frio e em seguida analisá-los utilizando o DimPerfil.

Na Tabela 8, pode-se observar os dados dos esforços de cada perfil. Para a análise dos resultados, adotou-se a flexão composta (fcomp) como principal critério. Conforme Beer et al. (2019) e Hibbeler (2019), a fcomp ocorre quando um elemento estrutural está sujeito à atuação simultânea de forças normais e momentos fletores.

Também foram considerados os efeitos do Vd, da flexão (f) e do cisalhamento (τ). O software interpreta o valor 1 como 100% de utilização da capacidade do perfil e 0 como 0%. Dessa forma, se o resultado estiver no intervalo entre 0 e 1, considera-se que o perfil está aprovado para suportar os esforços aos quais está submetido.

TABELA 8. Esforços dos perfis

Plataforma	Esforços				
	Viga	N_d [kN]	M_{xd} [kNcm]	M_{yd} [kNcm]	V_d [kN]
Móvel	1 e 2	0	113,6	1,16	1,281
	4 e 5	1,31	124,37	3,2	1,45
	3, 8 e 9	0,63	12,6	4	2,78
	6 e 7	1,1	0,81	0,42	0,02
	10	0	0,08	0,08	0
Fixa	1 e 2	0	15,6	0,94	1,71
	3 e 4	0,9	97,38	1,7	0,82
	5 e 6	0,13	111,6	1,73	1,32
	7	0	0,2	0	0
	8	0	0,1	0,02	0
	9 e 10	0	0,02	0,15	0

Fonte: Autor (2025).

Na Tabela 9, pode-se observar os resultados obtidos no DimPerfil. Para a otimização dos perfis, adotou-se o FS mínimo de 1,6, conforme a NBR ISO 9386-1 (ABNT, 2013). Estabelecendo a relação entre o FS e o valor máximo 1, considerado pelo software para aprovação do perfil, obtém-se 0,625. Dessa forma, perfis que apresentem um valor superior a 0,625 não devem ser aprovados.

TABELA 9. Resultados obtidos no DimPerfil.

Parte	Resultados - NBR 14762 (ABNT, 2010)			
	Viga	*fcomp* [0 – 1]	*Vd* [kN]	*f* e *τ* [0 – 1]
Móvel	1 e 2	0,38	34,82	0,13
	4 e 5	0,24	44,38	0,05
	3, 8 e 9	0,28	14,92	0,05
	6 e 7	0,05	14,92	0
	10	0	13,353	0
Fixa	1 e 2	0,06	34,82	0
	3 e 4	0,35	34,82	0,1
	5 e 6	0,22	44,38	0,04
	7	0	24,74	0
	8	0,01	14,92	0
	9 e 10	0,01	14,92	0

Na Tabela 10, observa-se os perfis otimizados. Pode-se notar que a otimização de todos os perfis formados a frio resulta em uma redução total de 46 kg de aço.

TABELA 10. Perfis otimizados

Parte	Otimização						
	Viga	Perfil Otimizado	*ρ*	*fcomp*	*Vd*	*f* e *τ*	Redução
Móvel	1 e 2	U 75x40x3	3,41	0,56	24,74	0,29	3,74
	4 e 5	Ue 100x50x17x1,5	2,64	0,59	18,46	0,28	5,08
	3, 8 e 9	Ue 50x25x10x1,2	1,05	0,55	7,1	0,23	2,71
	6 e 7	Ue 50x25x10x1,3	1,05	0,1	7,1253	0	1,75
	10	L 30 x 2,00	0,89	0,2	6,8	0	1,06
Fixa	1 e 2	U 50x25x1,5	1,12	0,56	8,64	0,25	9,77
	3 e 4	U 75x40x2,65	3,043	0,61	22,34	0,31	5,58
	5 e 6	Ue 100x50x17x1,5	2,64	0,54	18,46	0,27	10,35
	7	Ue 50 x 25 x 10 x 1,20	1,05	0	7,1	0	2,61
	8	Ue 50 x 25 x 10 x 1,21	1,05	0,01	7,1	0	1,21
	9 e 10	Ue 50 x 25 x 10 x 1,22	1,05	0,01	7,1	0	2,15

Fonte: Autor (2025).

5 CONCLUSÕES

A otimização da plataforma de elevação hidráulica para cadeirantes resultou em um sistema mais seguro e eficiente, atendendo às necessidades de acessibilidade e mobilidade reduzida.

O software Autodesk Inventor 2024 provou sua eficácia na modelagem 3D, na análise estrutural e na parametrização dos perfis, permitindo conceber uma estrutura robusta e funcional, dimensionada para as cargas de projeto.

Os objetivos propostos foram integralmente alcançados a partir do alinhamento às normas técnicas e da definição dos requisitos funcionais do projeto. O dimensionamento analítico do circuito hidráulico assegurou um acionamento suave, estável e seguro, enquanto as análises de tensão confirmaram a integridade mecânica e a confiabilidade operacional da estrutura.

Além disso, a otimização dos perfis em aço ASTM A36 reforçou a eficiência do equipamento, proporcionando uma economia de 46 kg de aço na estrutura total. A aplicação do software DimPerfil foi indispensável para avaliar os Estados Limites Últimos (ELU) dos perfis formados a frio, garantindo precisão no dimensionamento e mantendo a elevada durabilidade do sistema.

Por fim, a incorporação dos elementos elétricos de controle e proteção, como chaves de fim de curso e relés, foi determinante para a segurança operacional. Assim, o trabalho demonstra a viabilidade técnica e econômica do projeto, alinhando eficiência estrutural, segurança e conformidade normativa.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM. A 36/A 36M – 01: Standard Specification for Carbon Structural Steel. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12892: Elevadores unifamiliares ou de uso por pessoas com mobilidade reduzida — Requisitos de segurança para construção e instalação. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6355: Perfis estruturais de aço formados a frio — Padronização de formas e dimensões. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9050: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR ISO 9386-1: Plataforma de elevação vertical de acessibilidade – Requisitos para segurança, dimensões e operações funcional. Parte 1: Plataformas de elevação vertical. Rio de Janeiro: ABNT, nov. 2013.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDES, M. F.; ARAÚJO, R.; ITO, A. E. Manual da hidráulica. 9 ed. São Paulo: Blucher, 2015. 632 p.

BEER, F. P., JOHNSTON, E. R., MAZUREK, D. F. Estática: mecânica vetorial para engenheiros. 11 ed. Porto Alegre: AMGH, 2019. 646P.

BORGES, M. L.; SANTOS, C. H. A. O.; DAIER, R. N. (IN) Acessibilidade versus políticas públicas: A realidade das pessoas com deficiência no Brasil. Revista Latino-Americana De Relações Internacionais, Rio Grande – RS, v. 3, p. 90-98, abr. 2021. Disponível em: https://www.seer.furg.br/cn/article/download/13043/8810/41964. Acesso em: 29 out. 2021.

BRASIL. [Constituição (1988)]. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Presidência da República, [1988]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm. Acesso em: 22 jan. 2025.

BRASIL. Lei nº 13.146, de 6 de julho de 2015. Institui a Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Estatuto da Pessoa com Deficiência). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 2, 7 jul. 2015.

FERREIRA, L. C.; NETO, D. F.; SOARES F., M.; SILVA, L. P. L.; SILVA, E. S. Análise estrutural e otimização de perfis de plataforma de elevação vertical para cadeirantes. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL, 25., 2025, João Pessoa. Anais [...]. João Pessoa: FENEMI, 2025. p. 1-16

FIALHO, A. B. Automação hidráulica: projetos, dimensionamento e análise de circuito. 7 ed. São Paulo: Érica, 2018. 304 p.

FRANÇA, R. G. S. Construção de um protótipo de uma plataforma de acessibilidade de uso individual para pessoas com mobilidade reduzida. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Automação Industrial) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2023.

GUEDES, J. A. M. A eficiência energética em elevadores e escadas rolantes. 2017. Dissertação (Mestrado em Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.

HIBBELER, R. C. Resistência dos materiais. 10 ed. São Paulo: Pearson, 2019. 767p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2022: Pessoas com deficiência. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br. Acesso em: 15 jan. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. Pessoas com deficiência têm menor acesso à educação, ao trabalho e à renda. IBGE, 2024. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37317-pessoas-com-deficiencia-tem-menor-acesso-a-educacao-ao-trabalho-e-a-renda. Acesso em 29 out. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7465: Passenger lifts and service lifts - Guide rails for lift cars and counterweights - T-type. Geneva: ISO, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION-ISO. ISO 6020-1: Hydraulic fluid power — Mounting dimensions for single rod cylinders, 16 MPa (160 bar) series — Part 1: Medium series. ISO, ago. 2017.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL-ONU BRASIL. Cerca de um bilhão de pessoas com deficiência têm acesso negado à tecnologia assistiva. 2022. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/182189-cerca-de-um-bilh%C3%A3o-de-pessoas-com-defici%C3%AAncia-t%C3%AAm-acesso-negado-tecnologia-assistiva. Acesso em: 23 jan. 2025.

NETO, D. F. N.; FERREIRA, L. C. Projeto de otimização de plataforma de elevação hidráulica para acessibilidade de pessoas com mobilidade reduzida. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2025.

OLIVEIRA, G. C. R. Análise do acesso e mobilidade urbana sob a perspectiva da Norma ABNT NBR 9050. São Paulo: Ed. Blucher, 2020.

OLIVEIRA, G. C. R. Desenvolvimento de dispositivos de acessibilidade para pessoas com deficiência motora. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

Sanchez, E. Método dos estados limites últimos. Revista da Anicer, 2022. Disponível em: https://revista.anicer.com.br/metodo-dos-estados-limites-ultimos/#:~:text=O%20Estado%20Limite%20%C3%9Altimo%20est%C3%A1,casos%20especiais. Acesso em: 18 mar. 2025.

SENADO FEDERAL. Senadores defendem mais avanços nas políticas públicas ligadas à acessibilidade. Senado Federal, Brasília, 2024. Disponível em: https://www12.senado.leg.br/noticias/infomaterias/2024/09/senadores-defendem-mais-avancos-nas-politicas-publicas-ligadas-a-acessibilidade. Acesso em: 22 jan. 2025.

SILVA, V. P. Estruturas de aço: dimensionamento de perfis formados a frio segundo a NBR 14762 e NBR 6355. São Paulo: Ed. Blucher, 2018.

JACOB, F. TUTORIAL DE DIMPERFIL: SOFTWARE GRATUITO PARA DIMENSIONAMENTO DE PERFIS

FORMADOS A FRIO. O calculista de aço, 2020. Disponível em: https://calculistadeaco.com.br/tutorial-de-dimperfil-software-gratuito-para-dimensionamento-de-perfis-formados-a-frio/. Acesso em: 28 fev. 2020.

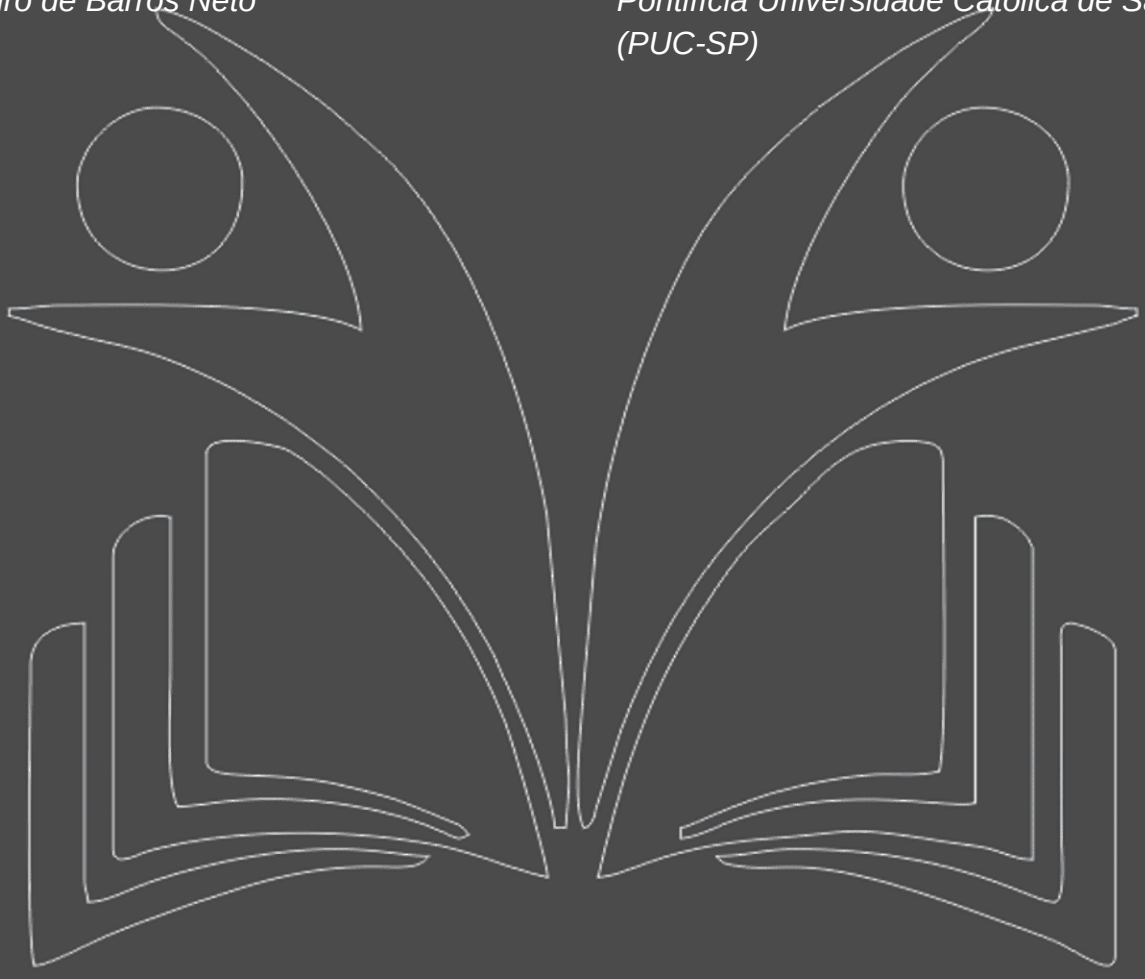
Capítulo 26

10.37423/260911451

ENGENHARIA KANSEI E IA GENERATIVA: ESTRATÉGIAS PARA A PRODUÇÃO DE EXPERIÊNCIAS DIGITAIS HIPERPERSONALIZADAS

JOÃO PEDRO PINHEIRO DE OLIVEIRA DA MOTA BARROS Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP)

João Pinheiro de Barros Neto Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP)



RESUMO

A hiperpersonalização digital tem se consolidado como estratégia essencial na diferenciação de produtos e serviços, especialmente no contexto da economia da experiência. Este estudo investigou como a aplicação da inteligência artificial (ia) generativa, aliada à engenharia kansei, pode potencializar o desenvolvimento de sites hiperpersonalizados centrados na experiência do usuário. A pesquisa, de caráter exploratório, foi conduzida por meio de survey com 34 web designers atuantes no desenvolvimento de sites. Os dados foram analisados quantitativamente e qualitativamente, com apoio de estatísticas descritivas e nuvens de palavras. Os resultados revelam que a ia generativa é percebida como uma ferramenta promissora para personalização em massa, enquanto a engenharia kansei contribui para a criação de experiências digitais emocionalmente significativas. Conclui-se que a integração dessas abordagens representa uma tendência tecnológica relevante para a produção digital, promovendo inovação, engajamento e valor percebido pelo usuário.

Palavras-chaves: hiperpersonalização digital; inteligência artificial generativa; engenharia kansei; experiência do usuário (ux); desenvolvimento de sites.

1 INTRODUÇÃO

A hiperpersonalização digital tem se consolidado como uma estratégia essencial para empresas que buscam se destacar em um mercado cada vez mais competitivo e orientado pela experiência do usuário. No contexto da economia da experiência, a simples entrega de produtos ou serviços já não é suficiente para garantir a fidelização do consumidor. É necessário proporcionar vivências únicas, emocionalmente significativas e adaptadas às necessidades individuais dos usuários. Nesse cenário, a convergência entre Inteligência Artificial (IA) generativa e Engenharia Kansei surge como uma abordagem promissora para o desenvolvimento de soluções digitais hiperpersonalizadas.

A IA generativa, ao permitir a criação automatizada de conteúdos e interfaces com base em grandes volumes de dados, oferece novas possibilidades para a customização em massa, enquanto a Engenharia Kansei, ao traduzir emoções e percepções subjetivas dos usuários em parâmetros de design, contribui para a criação de experiências digitais mais envolventes e afetivamente relevantes. Essa combinação tecnológica e metodológica permite não apenas atender às expectativas funcionais dos usuários, mas também gerar conexões emocionais profundas, promovendo maior engajamento e lealdade à marca.

Apesar do crescente interesse por essas tecnologias, ainda são escassos os estudos que investigam como profissionais do design digital, especialmente web designers, percebem e aplicam essas abordagens em seus processos criativos. Compreender essas percepções é fundamental para identificar oportunidades, desafios e caminhos para a adoção efetiva da IA generativa e da Engenharia Kansei no desenvolvimento de sites e interfaces digitais.

Diante disso, este estudo se justifica pela necessidade de aprofundar o entendimento sobre o papel dessas tecnologias na produção de experiências digitais hiperpersonalizadas, contribuindo para o avanço do conhecimento na área de desenvolvimento de produtos digitais e para a prática profissional no campo do design centrado no usuário.

Diante do avanço das tecnologias digitais e da crescente valorização da experiência do usuário, este estudo propõe-se a analisar as percepções e práticas de web designers em relação à aplicação da Inteligência Artificial (IA) generativa e da Engenharia Kansei no desenvolvimento de sites hiperpersonalizados. A proposta parte do entendimento de que, ao integrar essas duas abordagens, ou seja, uma voltada à automação criativa e outra à tradução de emoções em parâmetros de design,

é possível criar experiências digitais mais significativas, envolventes e personalizadas, alinhadas às expectativas dos usuários contemporâneos.

Para alcançar esse propósito, o estudo se debruça sobre três eixos principais. O primeiro busca investigar o nível de conhecimento e o grau de utilização da IA generativa e da Engenharia Kansei entre profissionais que atuam no desenvolvimento de sites. O segundo eixo visa identificar os principais desafios enfrentados por esses profissionais na aplicação prática dessas tecnologias, considerando aspectos técnicos, criativos e organizacionais. Por fim, o terceiro eixo se dedica a avaliar o potencial dessas abordagens para promover inovação e diferenciação na produção digital, especialmente no contexto da customização em massa e da economia da experiência.

Ao explorar essas dimensões, o trabalho pretende contribuir para o avanço do conhecimento sobre o papel estratégico da IA e do design emocional na criação de produtos digitais centrados no usuário. A seguir, apresenta-se o referencial teórico que fundamenta esta investigação, abordando os conceitos-chave de hiperpersonalização, experiência do usuário, Engenharia Kansei e Inteligência Artificial generativa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A construção de experiências digitais hiperpersonalizadas, centradas nas emoções e necessidades dos usuários, exige uma base teórica sólida que integre conceitos de design emocional, personalização em massa e tecnologias emergentes. Neste contexto, a presente seção apresenta uma análise crítica da literatura relacionada à hiperpersonalização digital, à economia da experiência, à Engenharia Kansei e à Inteligência Artificial generativa. O objetivo é contextualizar teoricamente os fundamentos que sustentam a proposta deste estudo, identificando contribuições relevantes, lacunas e oportunidades para a aplicação integrada dessas abordagens no desenvolvimento de soluções digitais inovadoras.

2.1 Hiperpersonalização e economia da experiência

A personalização de produtos e serviços tem se tornado uma estratégia central para organizações que buscam se destacar em um ambiente de negócios cada vez mais competitivo e orientado pelas expectativas dos consumidores. Segundo pesquisa conduzida pela Harvard Business Review Analytic Services (2018), nove em cada dez executivos entrevistados afirmam que os clientes esperam que as empresas compreendam seus interesses e antecipem suas necessidades. Essa expectativa crescente

impulsiona a adoção de tecnologias e metodologias que permitam uma personalização mais profunda e significativa, especialmente no ambiente digital.

A compreensão conceitual entre personalização e customização é fundamental para o aprofundamento da hiperpersonalização digital. Enquanto a personalização refere-se à adaptação automática de produtos, serviços ou interfaces com base em dados comportamentais do usuário, realizada pelo próprio sistema, a customização envolve a intervenção ativa do usuário, que escolhe diretamente as características desejadas de um produto ou serviço. Essa distinção é relevante no contexto da experiência digital, pois evidencia diferentes níveis de controle e participação do usuário no processo de adaptação da oferta (THIEL, 2025).

Nesse contexto, a hiperpersonalização de websites emerge como uma prática que vai além da simples customização visual. Ela envolve a adaptação dinâmica de cores, padrões, imagens, vetores e da organização da informação, com o objetivo de atender às preferências individuais de cada usuário. Essa abordagem transforma o site em uma experiência única, capaz de gerar conexões emocionais mais intensas entre o usuário e a marca. Como destacam Pine II e Gilmore (2011), ao consumir uma experiência, o usuário não apenas adquire um produto ou serviço, mas se envolve em uma sequência de eventos memoráveis encenados pela empresa, o que amplia o valor percebido da oferta.

A economia da experiência, proposta por Pine II e Gilmore (1998, 1999, 2011), sustenta que a personalização em massa de bens os transforma em serviços, e a personalização em massa de serviços os transforma em experiências. Essa progressão do valor econômico evidencia uma mudança no foco das organizações: de produtos padronizados para experiências personalizadas, capazes de gerar diferenciação e fidelização. A experiência, nesse sentido, torna-se um ativo estratégico, pois permite estabelecer vínculos emocionais duradouros com os usuários, promovendo maior engajamento e lealdade à marca.

Segura e Oliveira (2022) reforçam essa perspectiva ao argumentar que a transformação do produto em experiência, mediada pelo consumo de tecnologia, altera profundamente a percepção do ato de consumir. Para os autores, o consumo contemporâneo não se limita à aquisição de bens ou serviços, mas envolve a vivência de experiências imersivas em ambientes digitais, o que amplia as possibilidades de interação e personalização.

É nesse cenário que se insere o conceito de experiência do usuário (User Experience – UX), entendido como uma abordagem centrada no usuário para o design de produtos e serviços. A UX busca proporcionar interações positivas, relevantes e emocionalmente significativas entre as pessoas e a tecnologia. Stati e Sarmento (2021) apontam que essa abordagem deriva diretamente dos princípios da economia da experiência, ao enfatizar o papel das emoções e sensações na criação de valor para o consumidor.

Dessa forma, a hiperpersonalização digital, aliada à economia da experiência e à UX, configura-se como um campo fértil para a aplicação de tecnologias emergentes, como a Inteligência Artificial generativa e a Engenharia Kansei. Essas abordagens, ao permitirem a criação de experiências digitais emocionalmente ressonantes e adaptadas às necessidades individuais, representam uma evolução significativa na forma como produtos e serviços são concebidos e entregues no ambiente digital.

A palavra “hiperpersonalização” está, hoje, profundamente enraizada no imaginário do consumidor digital, que constantemente busca ofertas moldadas às suas preferências e necessidades específicas. Como observa Lemnisk (2019), a mente do consumidor digital opera de forma direta: identifica uma necessidade e procura, de forma quase automática, a solução mais personalizada possível para satisfazê-la. Essa expectativa por personalização contínua reflete uma mudança mais ampla no comportamento do consumidor e nas estratégias empresariais.

Nesse cenário, a centralidade do cliente emergiu como um princípio fundamental nas organizações contemporâneas. Morton et al. (2024) destacam que essa mudança de paradigma é impulsionada pela crescente consciência das empresas sobre a importância de colocar o cliente no centro de suas decisões estratégicas, não apenas como uma vantagem competitiva, mas como uma questão de sobrevivência. A transformação digital tem desempenhado um papel decisivo nesse processo, ao introduzir tecnologias que permitem a coleta, análise e utilização de grandes volumes de dados para gerar insights profundos e ações hiperpersonalizadas em tempo real.

A convergência entre o avanço tecnológico e o acesso ampliado a dados cria um ambiente propício para a personalização em massa, onde a Inteligência Artificial desempenha um papel central. Essa tecnologia viabiliza respostas rápidas e adaptativas às demandas dos usuários, reforçando a importância da experiência como diferencial competitivo. Como observa Lupton (2022), no século XXI, as experiências de design e consumo passaram a ofuscar a simples fabricação de produtos físicos. As

experiências evocam emoções, criam memórias e envolvem os usuários em interações sensoriais e simbólicas que se tornam mais significativas do que o próprio evento em si.

A economia da experiência, portanto, não apenas transformou a forma como produtos e serviços são concebidos e entregues, mas também redefiniu o papel das organizações na sociedade. Escolas, hospitais e empresas de todos os setores passaram a incorporar princípios de design experiencial em suas práticas, buscando oferecer vivências memoráveis e emocionalmente relevantes (Lupton, 2022). Nesse contexto, a hiperpersonalização digital, mediada por tecnologias como a IA generativa e metodologias como a Engenharia Kansei, representa uma evolução natural e necessária na forma de criar valor para o consumidor contemporâneo.

2.2 Engenharia Kansei e o design emocional

O conceito de design, amplamente difundido e aplicado em diversas áreas do conhecimento, abrange desde o design de ambientes, produtos e serviços até o design gráfico, instrucional, de moda, de processos e, mais recentemente, o design digital. Essa diversidade reflete a evolução do design enquanto disciplina, que deixou de se concentrar exclusivamente na funcionalidade e qualidade técnica dos produtos para incorporar dimensões emocionais e afetivas, reconhecendo a importância das reações subjetivas dos usuários frente às soluções projetadas.

Nesse contexto, destaca-se a Engenharia Kansei (EK), uma metodologia de design emocional desenvolvida na década de 1950 por Mitsuo Nagamachi. A EK propõe a tradução de sentimentos, percepções e emoções dos usuários em atributos tangíveis de design, permitindo que produtos e serviços sejam concebidos não apenas para atender às necessidades funcionais, mas também para evocar respostas emocionais positivas (Ribeiro; Providência, 2021). Essa abordagem tem sido aplicada com sucesso em setores diversos, como a indústria automobilística, de eletrodomésticos e hospitalidade (Nagamachi, 1995, 2010), demonstrando sua eficácia na criação de experiências mais significativas e na ampliação da aceitação de mercado.

A Engenharia Kansei distingue-se por sua capacidade de promover uma interação mais profunda entre o usuário e o produto, utilizando métodos como modelagem matemática, realidade virtual e análise estatística para captar e interpretar as percepções emocionais dos usuários (Nagamachi; Lokman, 2011). Essa metodologia permite uma compreensão mais refinada das necessidades subjetivas dos

consumidores, o que a torna especialmente relevante no contexto da hiperpersonalização digital, onde a experiência do usuário é central.

Lokman (2010) destaca que a EK se diferencia de outras metodologias de desenvolvimento de produtos, como o Desdobramento da Função Qualidade (QFD) e a Análise Conjunta, por seu foco nas necessidades emocionais implícitas dos consumidores. A autora descreve detalhadamente as etapas da metodologia, desde a definição do domínio até a síntese dos dados, e apresenta diversas técnicas qualitativas e quantitativas utilizadas para mensurar e analisar as respostas emocionais. A EK, portanto, configura-se como uma ferramenta poderosa para o design centrado no usuário, especialmente em projetos que visam à personalização e à criação de experiências digitais envolventes.

A evolução da Engenharia Kansei também tem sido objeto de reflexão teórica. Lévy (2013) propõe a emancipação do Design Kansei como uma nova disciplina, distinta da Engenharia e da Ciência Kansei, ao enfatizar sua inspiração na filosofia e cultura japonesa. O autor argumenta que o Design Kansei oferece novas possibilidades criativas ao integrar percepções sensoriais e emocionais no processo de design, promovendo uma relação mais holística entre seres humanos e artefatos.

A relevância da EK no campo do design emocional é reforçada por López, Murillo e González (2021), que realizaram uma revisão sistemática da literatura sobre metodologias baseadas na Engenharia Kansei aplicadas ao design de produtos. Os autores analisaram 87 estudos e identificaram as principais abordagens, destacando o uso preferencial das tipologias Kansei Modeling e Rough Sets, especialmente em produtos tecnológicos e eletrônicos. Essa sistematização oferece um guia valioso para pesquisadores e profissionais na escolha da metodologia mais adequada à personalização emocional de produtos.

A aplicabilidade da EK também se estende ao campo educacional, como demonstram Sugimoto e Silva (2014), ao utilizarem a metodologia na criação de materiais didáticos que atendem às necessidades emocionais dos alunos. As autoras destacam a técnica do Diferencial Semântico como ferramenta para traduzir emoções em especificações de design, contribuindo para a melhoria de processos cognitivos e comportamentais, como memória e resolução de problemas.

No setor de bens de consumo, Alves (2023) exemplifica a aplicação da Engenharia Kansei na reformulação da embalagem da água mineral “Água das Pedras”, utilizando análises estatísticas como regressão logística e múltipla. O estudo identificou elementos visuais da embalagem — como forma,

cor e relevo — que mais impactavam emocionalmente os consumidores, evidenciando o potencial da EK para fortalecer o posicionamento competitivo de produtos no mercado.

No contexto deste estudo, a Engenharia Kansei representa uma abordagem estratégica para o desenvolvimento de experiências digitais hiperpersonalizadas. Ao ampliar o papel do designer para além da estética e da funcionalidade, a EK enfatiza a importância de compreender e incorporar as emoções e percepções dos usuários no processo de criação, contribuindo para a construção de soluções digitais mais empáticas, envolventes e alinhadas às expectativas contemporâneas de consumo.

2.3 Inteligência Artificial e suas aplicações na produção digital

A Inteligência Artificial (IA) pode ser compreendida como um campo da ciência da computação que busca desenvolver sistemas capazes de simular a capacidade humana de aprender, raciocinar e tomar decisões. Em vez de seguir instruções rigidamente programadas, os sistemas de IA aprendem com exemplos e ajustam seu comportamento com base em dados, o que os torna aptos a resolver problemas complexos de maneira autônoma e adaptativa (Gabriel, 2022). Essa característica torna a IA uma ferramenta poderosa para automatizar tarefas rotineiras, otimizar processos e criar soluções inovadoras em diversas áreas, como previsão meteorológica, diagnóstico médico, geração de conteúdo e design digital.

A trajetória da IA remonta à primeira metade do século XX, com os trabalhos pioneiros de Alan Turing e John McCarthy, que lançaram as bases teóricas para a construção de máquinas inteligentes. No entanto, os avanços iniciais foram limitados pelas restrições tecnológicas da época. Foi apenas a partir da década de 1990 que o campo passou por um renascimento, impulsionado pelo desenvolvimento de técnicas como redes neurais artificiais e aprendizado de máquina (Boden, 2020). Esses avanços permitiram que os sistemas de IA reconhecessem padrões complexos em grandes volumes de dados, ampliando significativamente sua capacidade de atuação.

Mais recentemente, o surgimento do aprendizado profundo (deep learning) e a aplicação de algoritmos de IA em áreas como visão computacional e processamento de linguagem natural têm ampliado exponencialmente o potencial da IA para realizar tarefas cognitivas sofisticadas. Essas tecnologias não apenas automatizam processos, mas também possibilitam a criação de experiências

digitais mais ricas, personalizadas e interativas, características essenciais no contexto da hiperpersonalização.

Além de seu impacto prático, a pesquisa em IA tem contribuído para a compreensão dos processos cognitivos humanos e animais, ao explorar paralelos entre o funcionamento das redes neurais artificiais e os mecanismos de aprendizagem biológica. No entanto, como alerta Boden (2020), o avanço acelerado da IA também levanta importantes questões éticas, como o viés algorítmico, a transparência das decisões automatizadas e a privacidade dos dados. Esses desafios precisam ser enfrentados para garantir que os benefícios da IA sejam distribuídos de forma justa e responsável.

No contexto deste estudo, a IA, especialmente em sua vertente generativa, representa uma tecnologia-chave para a criação de experiências digitais hiperpersonalizadas. Ao permitir a geração automatizada de interfaces, conteúdos e interações adaptadas às preferências individuais dos usuários, a IA generativa amplia as possibilidades do design centrado no usuário, tornando-se uma aliada estratégica da Engenharia Kansei na produção de soluções digitais emocionalmente significativas.

Diante do panorama teórico apresentado, observa-se que a convergência entre a hiperpersonalização digital, a Engenharia Kansei e a Inteligência Artificial generativa oferece um campo fértil para a inovação no design de experiências digitais centradas no usuário. A literatura evidencia o potencial dessas abordagens para transformar a forma como produtos e serviços são concebidos, promovendo maior engajamento emocional e valor percebido. Com base nesse embasamento, a próxima seção descreve os procedimentos metodológicos adotados neste estudo, detalhando o percurso investigativo utilizado para compreender as percepções e práticas de web designers frente à aplicação dessas tecnologias emergentes.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza exploratória, com abordagem quantitativa e qualitativa (Prodanov; Freitas, 2013), cujo objetivo principal foi analisar as percepções e práticas de web designers em relação à aplicação da Inteligência Artificial (IA) generativa e da Engenharia Kansei no desenvolvimento de sites hiperpersonalizados. A escolha por uma abordagem exploratória justifica-se pela necessidade de aprofundar o entendimento sobre um fenômeno ainda pouco investigado na literatura, especialmente no contexto brasileiro.

A coleta de dados foi realizada por meio de um survey online, aplicado entre os dias 11 de dezembro de 2024 e 2 de fevereiro de 2025. O instrumento de pesquisa consistiu em um formulário estruturado com 17 questões, sendo estas de natureza objetiva e dissertativa, elaborado com o intuito de captar tanto dados demográficos quanto percepções subjetivas dos participantes sobre o uso de IA generativa e Engenharia Kansei em projetos de web design.

A amostragem foi não probabilística por conveniência, composta por 34 respondentes que atuam profissionalmente como web designers, com experiência comprovada no desenvolvimento de sites. Os participantes foram convidados de forma voluntária por meio de redes sociais e plataformas digitais, assegurando diversidade de perfis e experiências. A especificidade do público-alvo, profissionais com atuação direta no desenvolvimento de interfaces digitais, justifica o tamanho da amostra, dado o caráter especializado da temática.

Os dados foram analisados por meio de estatísticas descritivas, com apoio do software Microsoft Excel, para as questões fechadas, e por meio de análise de conteúdo (Bardin, 2011; Rodrigues, 2025) para as respostas abertas. Como recurso complementar, foram utilizadas nuvens de palavras, geradas com a ferramenta Wordcloud (https://wordcloud.online/pt), com o objetivo de visualizar os termos mais recorrentes nas respostas dissertativas, facilitando a identificação de padrões e temas emergentes (Vilela et al., 2020).

Essa combinação de métodos permitiu uma análise abrangente, integrando a frequência de respostas com a profundidade qualitativa das percepções dos participantes (Silva et al., 2024), o que é especialmente relevante em estudos que envolvem inovação tecnológica e experiência do usuário.

A pesquisa foi conduzida em conformidade com os princípios éticos da pesquisa científica (Cunha et al., 2018). Todos os participantes foram informados previamente sobre os objetivos do estudo e concordaram com os termos por meio da assinatura digital do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), apresentado no início do formulário. O anonimato dos respondentes foi garantido, e nenhuma informação pessoal foi coletada ou divulgada. A submissão ao Comitê de Ética em Pesquisa não foi necessária, uma vez que o estudo não envolveu intervenções, riscos significativos ou coleta de dados sensíveis.

Entre as limitações identificadas, destaca-se o uso de uma amostra não probabilística, o que restringe a generalização dos resultados para o universo mais amplo de profissionais da área. Além disso, a

coleta de dados exclusivamente online pode ter limitado a participação de profissionais com menor familiaridade com ferramentas digitais ou acesso restrito à internet. Ainda assim, os dados obtidos oferecem insights relevantes e consistentes com os objetivos propostos, servindo como base para futuras investigações mais aprofundadas.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

A análise dos dados coletados por meio do survey aplicado a web designers permitiu identificar aspectos relevantes sobre o perfil dos participantes, suas percepções quanto à aplicação da Inteligência Artificial (IA) generativa e da Engenharia Kansei, bem como os principais desafios enfrentados no desenvolvimento de sites hiperpersonalizados.

A amostra foi composta por 34 profissionais atuantes no desenvolvimento de sites. A distribuição de gênero revelou uma predominância masculina, com 67,65% dos participantes se identificando como homens, 29,41% como mulheres e 2,94% preferindo não informar. Esse dado reflete a composição ainda desigual do setor de tecnologia, embora a presença feminina crescente indique avanços em direção à diversidade.

Quanto à formação acadêmica, demonstrada na Tabela 1, observou-se uma diversidade significativa entre os respondentes. A maioria possui formação em design, mas também foram identificadas formações em áreas como engenharia de software, análise de sistemas, economia e outras. Essa variedade evidencia a natureza interdisciplinar do desenvolvimento web e a convergência de competências técnicas e criativas.

TABELA 1 – Formação dos respondentes.

Resposta	Quantidade	Percentual
Análise e desenvolvimento de sistemas	2	5,88%
Bacharel em Comunicação e Mestre em TIDD	1	2,94%
Doutor em engenharia elétrica com solução de IA/ Ml	1	2,94%
Doutorado completo	2	5,88%
Doutoranda em Tecnologias da Inteligência e Design Digital	1	2,94%
Economia	1	2,94%
Engenharia de Software	1	2,94%
Mestrado	1	2,94%
Mestrado em Ciência e Tecnologia	1	2,94%
Mestrado em Design	1	2,94%
Mestre em Metodologias Ativas e tecnologias educacionais	1	2,94%
Sistema da Informação	1	2,94%
Superior completo em Ciências da computação	1	2,94%

Superior completo em Designer	10	29,41%
Superior completo em publicidade e propaganda	1	2,94%
Superior em Ciência da Computação	1	2,94%
Superior em tecnologia	1	2,94%
Superior incompleto	6	17,65%
Total	34	100%

Fonte: pesquisa.

As respostas abertas, apresentadas no Quadro 1, revelaram uma ampla gama de desafios na aplicação de Inteligência Artificial Generativa e Engenharia Kansei enfrentados pelos profissionais. Entre os mais citados estão a constante atualização tecnológica, a dificuldade de adaptação a novas ferramentas, a falta de conhecimento prático sobre IA, a pressão por prazos curtos, e a necessidade de atender simultaneamente a requisitos de acessibilidade, sustentabilidade digital e experiência do usuário.

QUADRO 1 – Desafios relatados na aplicação de IAG e EK.

A adaptação constante. Acredito que quase todo dia surgem novas tecnologias, novas maneiras de *layoutar* e codificar e temos sempre que nos manter atualizados o que na correria do dia a dia as vezes acaba ficando em segundo plano.
A constante atualização e aparição de novas tecnologias é um constante desafio para o desenvolvimento.
A usabilidade e a linguagem adequada para cada cliente e usuário.
Adequar o uso de tecnologias conforme necessidade das organizações
As plataformas para implementar os bancos de dados e as requisições API
As vezes falta de conhecimento prático
Cliente não especifica corretamente os requisitos funcionais do site
Construções e correções que demandam conhecimento em códigos.
Criação, as vezes sem criatividade, alguns bugs
Demandas gigantescas e prazos curtos
Desenvolvimento de ferramentas que apresentem predições para falhas em problemas de sistema de potência em tempo real.
Falta de agilidade nas etapas de pesquisa e difícil adaptação para cara projeto (*landing page*, *app* ou site).
Falta de estudo e conhecimento do assunto no geral, sei apenas o básico.
Falta de mão de obra
Falta de objetividade do cliente, falta de conhecimento do cliente.
Mudanças de frameworks
Mudanças frequentes de frameworks
Mudanças nas expectativas de usabilidade e requisitos de acessibilidade.
Novas tecnologias para criação e desenvolvimento de sites Arquitetura de software e gestão de projetos e contratos com clientes
Parte do desafio é atender a expectativa visual do cliente
Principalmente a necessidade de conhecimento de linguagens de programação
Prototipação mal elaborada, documentação inexistente, incompleta ou incorreta, falta de conhecimento de ferramentas de colaboração por parte da equipe.
Recursos limitados e falta de entendimento por parte da chefia das tendências e práticas.
São principalmente desafios de ordem técnicas e de usabilidade. Hoje os dois principais desafios são a acessibilidade e utilização/adaptação ao *green-it/green-design*. Meu desafio com acessibilidade envolve que o site seja funcional para todos os usuários, incluindo aqueles com deficiências, o que envolve ajustes no contraste de cores, navegação por teclado, voz etc. e outros recursos (isso gera um grande desafio, também, na parte de *discovery*, prototipação... antes da parte de desenvolver). Já a adaptação ao *green* IT/*green design* tem se tornado crucial, pois a otimização do site para reduzir o consumo de energia e a pegada de carbono impacta diretamente na performance e na sustentabilidade digital. No meu caso, o desafio reside

em práticas de redução do tamanho de arquivos, escolha de servidores mais eficientes, utilização de técnicas de design (fontes, ícones, cores) que diminuem o consumo de energia e a pegada de carbono, etc. E tudo isso ainda é muito, digamos, "novo "ou, melhor, recente. Isso, no entanto, gera um segundo desafio: um site otimizado para sustentabilidade impacta em performance e em financeiro (ex.: tornando o carregamento mais rápido e eficiente, contribui para um ambiente digital com menor uso de recursos e emissão de gases de efeito estufa que gera mais ou menos custo - não há um padrão -, depende muito da arquitetura e isso é uma assunto bastante quente e com *muuuitas* variáveis que, por vezes, escapam ao meu escopo de design e escalam para outras áreas). Aí, estes dois desafios anteriores acabam impactando em duas coisas que, na teoria, eu já tinha "resolvido" no passado: experiência digital e "*cross-platform*". Ou seja: compatibilidade entre navegadores (para garantir que cada navegador pode interpretar o código de forma distinta, exigindo ajustes para garantir consistência no funcionamento do site) e, o mais "banal" o design responsivo que, neste contexto, relatado acima, acaba me gerando novos desafios pois meu time e eu precisamos adaptar não só a uma variedade de dispositivos e tamanhos de tela mas, como falado antes, a inúmeras "acessibilidades", assegurando uma boa experiência em qualquer plataforma e para qualquer usuário.
Segurança, volume de acessos, entre outros.

Fonte: pesquisa.

A Figura 1, que apresenta a nuvem de palavras gerada a partir das respostas abertas dos web designers, revela de forma visual os principais termos associados aos desafios enfrentados na aplicação da Inteligência Artificial Generativa (IAG) e da Engenharia Kansei (EK). Palavras como "tecnologia", "cliente", "acessibilidade", "conhecimento", "usuário" e "desafio" aparecem com destaque, indicando os focos centrais das preocupações dos profissionais. A predominância do termo "desafio" reforça a percepção de que a adoção dessas tecnologias ainda é marcada por obstáculos significativos, tanto de ordem técnica quanto organizacional. A presença de termos como "acessibilidade" e "usuário" evidencia a preocupação com a experiência inclusiva e centrada no ser humano, enquanto "tecnologia" e "conhecimento" apontam para a necessidade constante de atualização e capacitação frente à rápida evolução das ferramentas digitais.

FIGURA 1 – Nuvem de palavras com os desafios relatados na aplicação de IAG e EK.



Fonte: pesquisa.

Esses achados estão em consonância com a literatura, que aponta a rápida evolução tecnológica e a crescente complexidade das demandas dos usuários como fatores críticos no design digital (Lupton, 2022; Morton et al., 2024). A necessidade de integrar múltiplas dimensões — técnicas, emocionais, funcionais e éticas — torna o papel do designer cada vez mais estratégico e multidisciplinar.

Os resultados indicam que, embora a IA generativa e a Engenharia Kansei sejam reconhecidas como ferramentas promissoras para a criação de experiências digitais hiperpersonalizadas, sua aplicação prática ainda enfrenta barreiras significativas. A falta de domínio técnico, a resistência à mudança e a ausência de metodologias integradas são obstáculos que precisam ser superados para que essas abordagens sejam plenamente incorporadas ao processo de design.

Do ponto de vista teórico, os dados reforçam a relevância de se aprofundar o estudo sobre a convergência entre tecnologia e emoção no design digital. A Engenharia Kansei, ao traduzir sentimentos em parâmetros de projeto, e a IA generativa, ao automatizar e personalizar interfaces, oferecem caminhos complementares para a inovação centrada no usuário.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo analisar as percepções e práticas de web designers em relação à aplicação da Inteligência Artificial (IA) generativa e da Engenharia Kansei no desenvolvimento de sites hiperpersonalizados, com foco na criação de experiências digitais emocionalmente significativas. A partir de uma abordagem exploratória, foi possível identificar o potencial dessas tecnologias para transformar a forma como produtos digitais são concebidos, promovendo maior engajamento, personalização e valor percebido pelos usuários.

Os resultados obtidos revelaram que, embora os profissionais reconheçam a importância da IA generativa e da Engenharia Kansei, ainda existem desafios significativos para sua aplicação prática. Entre os principais obstáculos estão a constante atualização tecnológica, a falta de conhecimento técnico aprofundado, a pressão por prazos curtos e a necessidade de atender simultaneamente a requisitos de acessibilidade, sustentabilidade e experiência do usuário. Esses achados reforçam a necessidade de capacitação contínua e de metodologias integradas que facilitem a adoção dessas abordagens no cotidiano do design digital.

A análise também evidenciou que a convergência entre IA e Engenharia Kansei representa uma oportunidade estratégica para a inovação na produção digital, especialmente no contexto da economia da experiência e da centralidade do cliente. Ao integrar automação inteligente com sensibilidade emocional, essas tecnologias ampliam as possibilidades de criação de interfaces mais humanas, responsivas e memoráveis.

Como contribuição teórica, o estudo aprofunda a compreensão sobre o papel da hiperpersonalização digital no design centrado no usuário, destacando a relevância de abordagens interdisciplinares que combinem tecnologia, emoção e experiência. Do ponto de vista prático, oferece subsídios para profissionais e organizações que desejam explorar novas formas de diferenciação e valor agregado em ambientes digitais.

Entretanto, esta pesquisa apresenta limitações, como o uso de uma amostra não probabilística e restrita a um grupo específico de profissionais, o que limita a generalização dos resultados. Além disso, a coleta de dados exclusivamente online pode ter excluído perfis com menor acesso digital. Para estudos futuros, recomenda-se a ampliação da amostra, a realização de estudos de caso aplicados e a investigação de modelos híbridos que integrem IA generativa e Engenharia Kansei em projetos reais de design digital, com avaliação empírica dos impactos na experiência do usuário.

REFERÊNCIAS

ALVES, Joana Cidade. Kansei Engineering methodology to support the development of a water bottle packaging. Lisboa: Departamento de Engenharia e Gestão da Universidade de Lisboa, 2023.

BARDIN, Laurence. Análise de conteúdo. São Paulo: Edições 70, 2011.

BODEN, Margaret A. Inteligência artificial: uma brevíssima introdução. São Paulo: UNESP, 2020.

CUNHA, Thiago Rocha da; PERUZZO JÚNIOR, Léo; MEIRELLES, Jussara Maria Leal de. Ética na pesquisa científica. Curitiba: PUCPRESS, 2018.

GABRIEL, Martha. Inteligência artificial: do zero ao metaverso. São Paulo: Atlas, 2022.

HBRAS, Harvard Business Review Analytic Services. The age of personalization: crafting a finer edge. Boston: Harvard Business Review, September 27, 2018. Disponível em: https://hbr.org/resources/pdfs/comm/mastercard/TheAgeOfPersonalization.pdf. Acesso em: 18 mai. 2023.

LEMNISK. Hyper-personalization: the key to enriching the customer experience (e-book). Dover: Lemnisk, 2019.

LÉVY, Pierre. Beyond Kansei Engineering: the emancipation of Kansei Design. International Journal of Design, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 83-94, 2013. https://www.ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/viewFile/1097/573.

LOKMAN, Anitawati Mohd. Design & Emotion: The Kansei Engineering Methodology. Malaysian Journal of Computing, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 1-14, 2010.

LÓPEZ, Óscar; MURILLO, Clara; GONZÁLEZ, Alfonso. Systematic literature reviews in Kansei Engineering for product design - a comparative study from 1995 to 2020. Sensors, [Besel], v. 21, n. 19, p. 6532, sep. 30, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/s21196532.

LUPTON, Ellen. O design como storytelling. São Paulo: Olhares, 2022.

MORTON, Flor; BENAVIDES, Teresa Treviño; GONZÁLEZ-TREVIÑO, Eduardo. Taking Customer-Centricity to New Heights: Exploring the Intersection of AI, Hyper-Personalization, and Customer-Centricity in Organizations. In: Smart Engineering Management. Cham: Springer International Publishing, 2024. p. 23-41. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-52990-0_2. Disponível em https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-52990-0_2. Acesso em: 12 abr. 2024.

NAGAMACHI, Mitsuo (ed.). Kansei/Affective Engineering. Boca Raton: CRC Press, 2010.

NAGAMACHI, Mitsuo. Kansei Engineering: A new ergonomic consumer-oriented technology for product development. International Journal of Industrial Ergonomics, [S.l.], v. 15, n. 1, p. 3-11, 1995.

NAGAMACHI, Mitsuo; LOKMAN, Anitawati. Mohd. Innovations of Kansei Engineering. Boca Raton: CRC Press, 2011.

PINE II, Joseph B; GILMORE, James H. The experience economy. Massachusetts: Harvard Business Review Press, 2011.

PINE II, Joseph B; GILMORE, James H. The experience economy: work is theatre and every business is a stage. Massachusetts: Harvard Business Review Press, 1999.

PINE II, Joseph B; GILMORE, James H. Welcome to the experience economy. In: Harvard Business Review, 76 (4), 97-105. Massachusetts: Harvard Business Review Press, 1998. Disponível em: https://hbr.org/1998/07/welcome-to-the-experience-economy; Acesso em 08 abr. 2024.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. Novo Hamburgo: Editora Feevale, 2013.

RIBEIRO, Iara Margolis; PROVIDÊNCIA, Bernardo. The Kansei Engineering and its approaches. InfoDesign - Journal of Information Design, [S. l.], v. 18, n. 1, 2021. DOI: https://doi.org/10.51358/id.v18i1.816.

RODRIGUES, Márcio Urel; BRITO, Acelmo de Jesus. Análise de conteúdo não é só contar palavras: análise de conteúdo como procedimento de análise interpretativa de dados em pesquisas qualitativas nas áreas de ensino e educação. Curitiba: CRV, 2025. DOI 10.24824/978652517273.6

SEGURA, Claudir; OLIVEIRA, Adriana Lima de. Redes e consumo: uma realidade virtual contemporânea. In: PRIOSTE, Marcelo (org.). Redes, séries e nós. Porto Alegre: Editora Fi, 2022.

SILVA, M. S. da; SANTOS NETO, A. S.; SANTOS, L. de P. S.; SILVA, M. M. S. da. Descobrindo as linguagens do Amapá: uma imersão visual na diversidade linguística através de nuvens de palavras. Caderno Pedagógico, [S. l.], v. 21, n. 9, p. e7628, 2024. DOI: 10.54033/cadpedv21n9-071.

STATI, Cesar Ricardo; SARMENTO, Camila Freitas. Experiência do usuário (UX). Curitiba: InterSaberes, 2021.

SUGIMOTO, Adriana; SILVA, Tânia Luisa Koltermann da. O Emprego da Engenharia Kansei no desenvolvimento de materiais de aprendizagem. In: Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, 8, 2014, Gramado. Anais. Gramado: Blucher Design Proceedings, 2014.

THIEL, Cristiane. Personalização e customização: qual é a diferença? Disponível em: https://cristianethiel.com.br/personalizacao-e-customizacao/. Acesso em: 12 jun. 2025.

VILELA, R. B.; RIBEIRO, A.; BATISTA, N. A. (2020). Word cloud as a tool for content analysis: an application to the challenges of the professional master´s degree courses in health education. Millenium - Journal of Education, Technologies, and Health, 2(11), 29–36. DOI: https://doi.org/10.29352/mill0211.03.00230.

Capítulo 27

10.37423/260911452

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO DE FILMES FINOS DE LIGAS FEMN.

Pedro Brito de Souza — *UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ*

Arthur De Farias Silva Rente — *UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ*

Ronald Borges Dos Reis — *UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ*

Yan Yago Da Silva De Andrade — *UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ*

Giovanna Mayssa Pinheiro Costa — *UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ*

RESUMO

Os filmes finos metálicos desempenham um papel fundamental na modificação e otimização das propriedades na superfície dos materiais. Este capítulo descreve a síntese de revestimentos finos de ligas ferro-manganês (FeMn) sobre substrato de latão através da técnica de eletrodeposição em meio aquoso, assim como a sua posterior caracterização composicional e avaliação eletroquímica face à corrosão. Foi avaliada a influência de diferentes densidades de corrente (30 a 60 mA/cm²) na incorporação dos metais na matriz metálica. A espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDS) revelou um aumento substancial de Mn com o aumento da densidade de corrente, atingindo um máximo de 36,7% at. a 50 mA/cm². Os ensaios de potencial de circuito aberto (OCP) em solução de NaCl a 3% indicaram perfis distintos de nobreza e estabilidade: Amostras ricas em Fe apresentaram potenciais de corrosão mais nobres e estáveis, ao passo que as ligas com teores mais elevados de Mn exibiram um comportamento transiente, evidenciando fenómenos de passivação superficial ao longo do tempo.

Palavras chaves: Filme fino, liga metálica, ferro-manganês, potencial de corrosão

1 INTRODUÇÃO

Os filmes finos são determinantes no desenvolvimento de materiais, principalmente na obtenção de ligas metálicas em forma de filme. Entre as principais propriedades aprimoradas por uma película metálica, destacam-se a resistência à abrasão, a dureza mecânica, a permeabilidade e a resistência à corrosão (Frey, 2015).

As ligas à base de ferro-manganês (Fe-Mn) têm despertado grande interesse científico e tecnológico, nomeadamente devido às suas propriedades mecânicas singulares e ao seu potencial de aplicação como biomateriais (Liu et al., 2020). A eletrodeposição apresenta-se como uma rota de processamento atrativa por ser econômica, permitir a obtenção destes revestimentos à temperatura ambiente e oferecer fácil controle sobre a espessura, a morfologia e a estequiometria do filme por meio da regulação minuciosa dos parâmetros elétricos e químicos do banho (Agarwal et al., 2010; Ticianelli & Gonzalez, 2013).

A presente pesquisa tem por objetivo abordar o desenvolvimento sistemático de filmes finos da liga Fe-Mn obtidos por eletrodeposição em meio aquoso sobre substrato de latão, correlacionando as densidades de corrente aplicadas com a composição elementar obtida e avaliando o potencial de corrosão desses materiais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aplicações da liga FeMn

A liga de ferro-manganês (FeMn) é utilizada principalmente na siderurgia, dividindo-se comercialmente em três classes de acordo com o nível de refino: Alto Carbono (HC-FeMn), com 70% a 82% de manganês e até 7,5% de carbono; Médio Carbono (MC-FeMn), com 75% a 95% de manganês e cerca de 2% de carbono; e Baixo Carbono (LC-FeMn), com 85% a 95% de manganês e carbono entre 0,2% e 0,5% (Tangstad, 2013).

Além disso, a liga FeMn é usada como biomaterial metálico biodegradável para implantes médicos temporários. O material destaca-se por sua taxa de degradação mais rápida em comparação ao ferro puro, além de excelente biocompatibilidade, propriedades antiferromagnéticas e compatibilidade

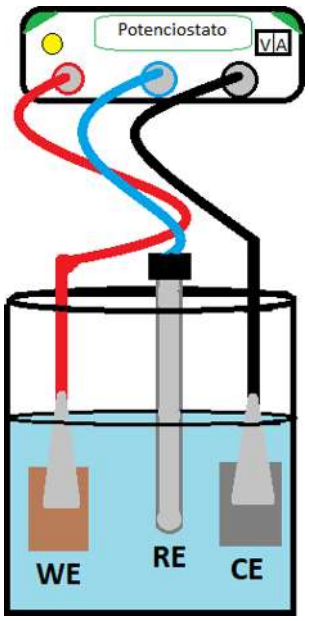
mecânica com o osso esponjoso (Hermawan; Dubé; Mantovani, 2010; Liu et al., 2020; Nayak; Biswal; Sahoo, 2020).

2.2 Eletrodeposição

A etapa inicial da eletrodeposição consiste na preparação do banho eletrolítico. Este é composto pelos sais dos metais a serem depositados no substrato, aos quais se incorporam aditivos que promovem o processo de eletrodeposição ou melhoram as propriedades morfológicas e estruturais dos depósitos obtidos (Kanani, 2004).

A célula eletroquímica pode ser constituída por dois eletrodos (cátodo e ânodo) ou apresentar uma configuração de três eletrodos: o eletrodo de trabalho (WE), em cuja superfície ocorre a deposição contínua; o eletrodo de referência (RE), que garante um potencial preciso no sistema; e o contraeletrodo (CE), que direciona a corrente em direção ao WE, conforme apresentado na Figura 1 (Lee et al., 2021).

Figura 1 - Célula eletroquímica



Fonte: Elaborado pelo autor

A eletrodeposição em meio aquoso ocorre, inicialmente, com a formação de uma camada de difusão próxima à superfície do eletrodo. Nessa região, realiza-se o transporte dos íons solvatados até o WE, onde os íons adsorvidos migram pela superfície até encontrar regiões preferenciais para a transferência de elétrons, dando início à nucleação (Lee et al., 2021).

2.3 Conceito de Potencial em circuito aberto (OCP)

O potencial em circuito aberto (OCP), ou potencial de corrosão ($Ecorr$), é a diferença de potencial elétrico espontânea entre um eletrodo e um de referência sem corrente externa, onde ocorrem as reações de oxidação do metal e redução do meio. Por ser uma variável dinâmica influenciada por fatores como composição do meio, pureza do metal e filmes passivos, seu monitoramento ao longo do tempo permite identificar processos na interface metal/solução, como a passivação, dissolução de óxidos e a ação de inibidores (De Souza Araujo, 2025).

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Banho Eletrolítico

O banho eletrolítico para a codeposição simultânea de ferro e manganês foi formulado a partir de reagentes de grau analítico dissolvidos em água deionizada. A composição química do eletrólito foi criteriosamente planejada para assegurar estabilidade e condutividade iónica:

- Fontes de Íons Metálicos: Sulfato de ferro ($FeSO_4$) e sulfato de manganês ($MnSO_4$), que fornecem os cátions necessários para a reação catódica.

- Eletrólito de Suporte: Sulfato de sódio (Na_2SO_4), cuja função é incrementar a condutividade elétrica do banho galvânico.

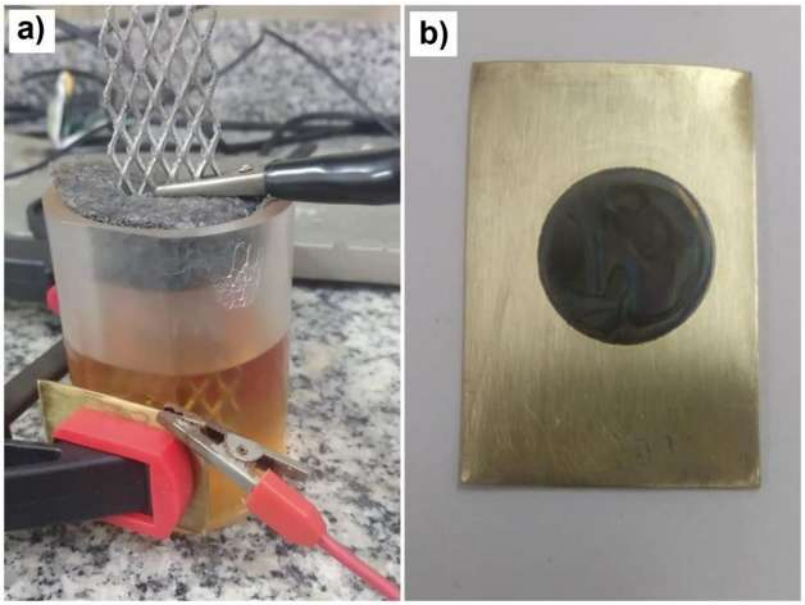
- Agente Complexante: Citrato de sódio ($Na_3C_6H_5O_7$), fundamental para aproximar os potenciais redox do Fe e do Mn, prevenindo a precipitação e coordenando os íons metálicos.

O pH operacional da solução foi monitorado com pHmetro e rigorosamente ajustado para o valor de 4,0 recorrendo à adição de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 0,5 M.

3.2 Parâmetros de Eletrodeposição

Os ensaios de deposição foram realizados à temperatura ambiente. Utilizou-se uma célula eletroquímica fixada por um grampo a uma placa de latão, a qual foi previamente polida e tratada por 0,5 HCl, conforme ilustrado na Figura 2. Com o auxílio de um potenciostato/galvanostato, aplicaram-se quatro densidades de corrente catódica distintas pelo tempo fixo de 20 minutos, Tabela 1.

Figura 2 - a) Sistema eletrolítico montado; b) filme fino eletrodepositado.



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na eletrodeposição

Amostra	Densidade de Corrente (mA/cm²)	Tempo de Deposição (min)	Substrato
1	30	20	Latão
2	40	20	Latão
3	50	20	Latão
4	60	20	Latão

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 Caracterização Composicional e Ensaio Eletroquímico

A quantificação dos elementos nos filmes finos obtidos foi determinada por Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios X (EDS). Posteriormente, o potencial de corrosão foi avaliado por meio do monitoramento do Potencial de Circuito Aberto (OCP) em função do tempo, em uma célula eletroquímica convencional contendo solução aquosa de cloreto de sódio (NaCl) a 3%, comparando-se o comportamento da liga ao do substrato de latão utilizado como controle.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Influência da Corrente na Estequiometria do Filme (EDS)

A quantificação elementar por EDS comprovou que a densidade de corrente aplicada afeta a razão de codeposição entre o ferro e o manganês. Em densidades de corrente reduzidas (30 a 40 mA/cm²), o ferro constitui a espécie metálica hegemónica na matriz do filme fino.

No entanto, observa-se que com o aumento da densidade de corrente, o teor de manganês aumenta. Na densidade de 50 mA/cm², a incorporação de Mn atingiu seu valor máximo (36,7 at%), havendo uma pequena diminuição para 24 at% sob a densidade de 60 mA/cm² (Tabela 2).

Tabela 2 - Valores da porcentagem atômica de cada elemento eletrodepositado da liga FeMn.

Amostra	Teor de Fe at%	Teor de Mn at%
1	96,0	4,0
2	81,0	19,0
3	63,3	36,7
4	76,0	24,0

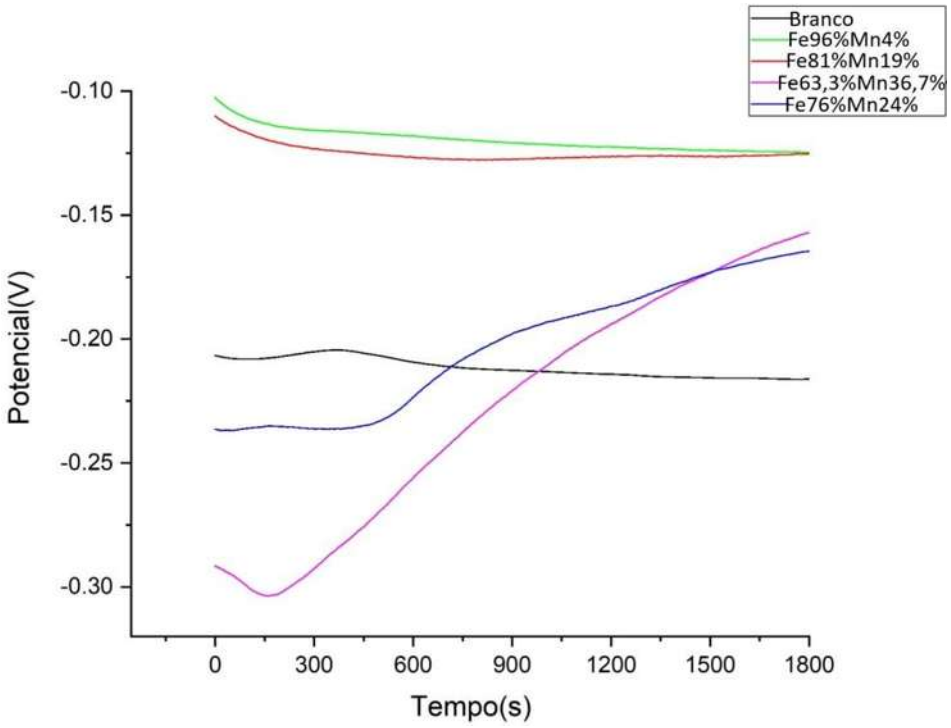
Fonte: Elaborado pelo autor

Ogura et al. (2018) confirma essa tendência ao demonstrar que densidades de corrente mais elevadas resultam no enriquecimento de Mn no depósito. Esse fenômeno é caracterizado por Brenner (2013) como codeposição anômala, em que o aumento da densidade de corrente favorece a incorporação do metal menos nobre na liga em detrimento do elemento mais nobre. Contudo, o potencial de redução acentuadamente negativo do íon Mn2+ em meio aquoso dificulta a sua eletrodeposição. Consequentemente, a reação de evolução do hidrogênio (REH) torna-se a principal reação secundária, consumindo grande parte da energia que seria destinada à redução metálica (Padhy; Tripathy; Alfantazi, 2018).

4.2 Potencial de Circuito Aberto (OCP)

A análise do potencial de circuito aberto (OCP) em eletrólito de NaCl 3% (Figura 3) evidenciou dois domínios eletroquímicos bem distintos.

Figura 3 - Curvas de OCP para as amostras sintetizadas sob diferentes densidades de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor

• Ligas Ricas em Ferro (Fe96Mn4 e Fe81Mn19): Apresentam valores de potencial de corrosão mais nobres (menos negativos) e estáveis desde os instantes iniciais de imersão. A fraca oscilação do potencial reflete uma taxa de dissolução homogénea e controlada, revelando grande inércia química no meio salino corrosivo.

• Ligas com Elevado Teor de Manganês (Fe76Mn24 e Fe63.3Mn36.7): Iniciam o contacto com o meio exibindo potenciais consideravelmente mais negativos, condizentes com a elevada reatividade eletroquímica do Mn. Contudo, o potencial delas aumenta gradualmente ao longo do tempo, o que pode indicar a formação de uma camada passiva de óxidos na superfície, tornando-as mais resistentes à corrosão com o passar do tempo.

Na literatura, há uma escassez de pesquisas que aprofundem a aplicação do OCP em amostras de filmes de FeMn obtidas por eletrodeposição. No entanto, estudos sobre outras técnicas de síntese dessa liga investigaram o monitoramento do OCP a fundo e observaram fenômenos semelhantes de deslocamento anódico.

Wiesener et al. (2017), ao estudarem ligas comerciais como o aço X-IP1000 (composto por 22,4% de Mn, 76% de ferro e elementos minoritários) em fluido corporal simulado modificado (m-SBF),

observaram que o material evoluiu de um potencial ativo inicial de -0,55 V para um potencial mais nobre de -0,31 V. Segundo Kupková et al. (2015), que utilizaram o método de sinterização por metalurgia do pó para a fabricação de amostras de FeMn imersas em solução de Hank a 37 °C, o deslocamento anódico espontâneo indica a formação e a estabilização de uma película passiva de produtos de corrosão (óxidos e oxi-hidróxidos de ferro e manganês) sobre a superfície. Essa camada atua como uma barreira física à transferência de massa e carga, conferindo maior proteção com o decorrer do tempo.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho validou a eletrodeposição em meio aquoso como uma técnica versátil e eficaz na obtenção de revestimentos finos de ligas de Fe-Mn sobre substrato de latão. A variação da densidade de corrente demonstrou ser uma ferramenta de controle direto da estequiometria dos filmes, permitindo transitar de matrizes maioritariamente ricas em ferro (Fe96Mn4) até sistemas com uma proporção intermediária de manganês (Fe63,3Mn36,7 a 50 mA/cm2).

A caracterização eletroquímica comprovou que o teor de manganês introduz uma dinâmica de passivação superficial promissora: embora as ligas mais ricas em manganês revelem maior suscetibilidade inicial ao ataque em meio salino, a posterior formação de películas de óxidos passivantes restabelece a estabilidade do material.

Como perspectivas para trabalhos futuros, almeja-se monitorar o potencial de circuito aberto (OCP) por períodos mais longos para avaliar melhor a estabilidade dos filmes, investigar a variação do pH do banho eletrolítico, caracterizar a morfologia por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e realizar ensaios de polarização potenciodinâmica linear (PPL) para a determinação da taxa de corrosão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, M et al. Effect of current density on the pulsed co-electrodeposition of nanocrystalline nickel-copper alloys. JOM (The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society), Pittsburgh, Pennsylvania,v. 62, n. 6, p. 88–92, 2010.

BRENNER, A. Electrodeposition of alloys: principles and practice. Cambridge, EUA: Elsevier, 2013.

DE S. ARAUJO, J. V et al. O que o potencial de circuito aberto pode nos informar sobre a resistência à corrosão de ligas de alumínio? Quimica nova, São Paulo v.48, n.9, p.1, 2025. FREY, H. Handbook of thin film technology. 1. ed. Berlim, Germany: Springer, 2015.

HERMAWAN, H; DUBÉ, D; MANTOVANI, D. Degradable metallic biomaterials: design and development of Fe-Mn alloys for stents. Journal of Biomedical Materials Research. Part A, New Jersey, United States, v. 93, n. 1, p. 1–11, 2010.

KANANI, N. Electroplating: Basic Principles, Processes and Practice. Berlin, Germany: Elsevier Ltd, 2004.

KUPKOVÁ, M. et al. Dimensional changes, microstructure, microhardness distributions and corrosion properties of iron and iron-manganese sintered materials. Archives of Metallurgy and Materials, Kraków, Poland, v. 60, n. 2, p. 639–642, 2015.

LEE, S.A. et al. Nanoscale electrodeposition: Dimension control and 3D conformality. Exploration, Beijing, China, v. 1, n. 3, p. 20210012, 2021.

LIU, P et al. Microstructure, mechanical properties, degradation behavior, and biocompatibility of porous Fe-Mn alloys fabricated by sponge impregnation and sintering techniques. Acta biomaterialia, Amsterdam, Netherlands, v. 114, p. 485–496, 2020.

NAYAK, P; BISWAL, A.K.; SAHOO, S.K. Processing and characterization of Fe-35Mn biodegradable metallic materials. Materials Today: Proceedings, Amsterdam, Netherlands,v. 33, p. 5284–5289, 2020.

OGURA, Y et al. Fabrication of defect-free Fe–Mn alloys by using electrodeposition. Materials Transactions, Sendai, Japan, v. 59, n. 6, p. 935–938, 2018.

PADHY, S. K; TRIPATHY, B. C; ALFANTAZI, A. Effect of sodium alkyl sulfates on electrodeposition of manganese metal from sulfate solutions in the presence of sodium metabisulphite. Hydrometallurgy, v. 177, p. 227–236, 2018.

TANGSTAD, M. Manganese Ferroalloys Technology. In: GASIK, M.(org.). Handbook of Ferroalloys. Trondheim, Norway: Elsevier, 2013. p. 221–266.

TICIANELLI, E. A.;GONZALEZ, E. R. Eletroquímica: Princípios e Aplicações. 2. ed. São Paulo: Edusp, 2013.

WIESENER, M. et al. Corrosion properties of bioresorbable FeMn-Ag alloys prepared by selective laser melting. Materials and Corrosion, Weinheim, Germany, v. 68, n. 10, p. 1028–1036, 2017.

ENGENHARIA: A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XXVII

conhecimentolivre.org/home
contato@conhecimentolivre.org
editoraconhecimentolivre



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE