

Aurum
EDITORA

CAMINHOS DA PESQUISA MULTIDISCIPLINAR



ORGANIZAÇÃO
AURUM EDITORA

Aurum
EDITORA

CAMINHOS DA PESQUISA MULTIDISCIPLINAR



ORGANIZAÇÃO
AURUM EDITORA

AURUM EDITORA LTDA - 2025
Curitiba – Paraná - Brasil

EDITOR CHEFE

Lucas Gabriel Vieira Ewers

ORGANIZADOR DO LIVRO

Aurum Editora Ltda

EDIÇÃO DE TEXTO

Stefanie Vitoria Garcia de Bastos

EDIÇÃO DE ARTE

Aurum Editora Ltda

IMAGENS DA CAPA

Freepik

BIBLIOTECÁRIA

Eliete Marques da Silva

ÁREA DE CONHECIMENTO

Ciências Multidisciplinar

Copyright © Aurum Editora Ltda

Texto Copyright © 2025 Os Autores

Edição Copyright © 2025 Aurum Editora
Ltda



Este trabalho está licenciado sob uma
licença Creative Commons Attribution-
NonCommercial-NoDerivatives
4.0 International License.

A responsabilidade pelo conteúdo, precisão e veracidade dos dados apresentados neste texto é inteiramente do autor, não refletindo necessariamente a posição oficial da Editora. O trabalho pode ser baixado e compartilhado, desde que o crédito seja dado ao autor, mas não é permitida a modificação do conteúdo de qualquer forma ou seu uso para fins comerciais.

Todos os manuscritos passaram por uma avaliação cega por pares, realizada pelos membros do Conselho Editorial, e foram aprovados para publicação com base em critérios de imparcialidade e objetividade acadêmica.

A Aurum Editora se compromete a manter a integridade editorial em todas as fases do processo de publicação, prevenindo plágio, dados ou resultados fraudulentos, e assegurando que interesses financeiros não afetem os padrões éticos da publicação. Qualquer suspeita de má conduta científica será verificada com atenção aos princípios éticos e acadêmicos.

CORPO EDITORIAL

Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos - Doutor em Letras pela Universidade Federal da Paraíba

Adriano Rosa da Silva - Mestre em História Social pela Universidade Federal Fluminense

Alessandro Sathler Leal da Silva - Doutor em Educação pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Alex Lourenço dos Santos - Doutorando em Geografia pela Universidade Federal de Catalão

Alisson Vinicius Skroch de Araujo - Editor Independente - Graduado em Criminologia pelo Centro Universitário Curitiba

Alline Aparecida Pereira - Doutora em Psicologia pela Universidade Federal Fluminense

Allysson Barbosa Fernandes - Mestre em Comunicação, Linguagens e Cultura pela Universidade da Amazônia

Ayla de Jesus Moura - Mestra em Educação Física pela Universidade Federal do Vale do São Francisco

Blue Mariro - Doutorando em Geografia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Camila Aparecida da Silva Albach - Doutoranda em Ciências Sociais Aplicadas pela Universidade Estadual de Ponta Grossa

Carina Mandler Schmidmeier - Mestranda em Direito pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Carolline Nunes Lopes - Mestra em Psicologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Cristiane Sousa Santos - Mestra em Educação pela Universidade Estadual de Feira de Santana

Dandara Christine Alves de Amorim - Doutoranda em Direito pela Universidade do Oeste de Santa Catarina

Daniel da Rocha Silva - Mestre em Letras pela Universidade Federal de Sergipe

Daniel Rodrigues de Lima - Mestre em História pela Universidade Federal do Amazonas.

Edson Campos Furtado - Doutor em Psicologia - Área de Concentração: Estudos da Subjetividade pela Universidade Federal Fluminense, UFF, Brasil.

Elane da Silva Barbosa - Doutora em Educação pela Universidade Estadual do Ceará

Fabio José Antonio da Silva - Doutor em Educação Física pela Universidade Estadual de Londrina.

Fabricio do Nascimento Moreira - Doutorando em Administração pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Felipe Antônio da Silva - Graduado em Direito pelo Centro Universitário Unihorizontes

Felipe Martins Sousa - Mestrando em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal do Maranhão, UFMA, Brasil.

Francisco Welton Machado - Editor Independente - Graduado em Geografia pela Universidade Estadual do Piauí

Gabriela da Silva Dezidério - Doutoranda em Sociologia pela Universidade Federal Fluminense

Gabriella de Moraes - Doutora em Direito pela Universidade Federal de Minas Gerais

Gleyson Martins Magalhães Reymão - Mestre Profissional em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação pelo Instituto Federal do Pará

Gustavo Boni Minetto - Mestrando em Educação, Linguagens e Tecnologia pela Universidade Estadual de Goiás

Hygor Chaves da Silva - Doutorando em Ciência dos Materiais pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, UFMS, Brasil.

Ítalo Rosário de Freitas - Doutorando em Biologia e Biotecnologia de Microrganismos pela Universidade Estadual de Santa Cruz

Itamar Victor de Lima Costa - Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais pela Universidade Católica de Pernambuco

João Vitor Silva Almeida - Graduado em Gestão de Cooperativas pela Universidade Federal do Tocantins

José Bruno Martins Leão - Doutor em Sistema Constitucional de Garantia de Direitos pela Instituição Toledo de Ensino

José Cláudio da Silva Júnior - Mestrando em Ciências da Saúde pela Universidade de Pernambuco

José Leonardo Diniz de Melo Santos - Mestre em Educação, Culturas e Identidades pela Universidade Federal Rural de Pernambuco

José Marciel Araújo Porcino - Graduado em Pedagogia pela Universidade Federal da Paraíba, UFPB, Brasil.

José Neto de Oliveira Felipe - Doutorando em Ensino de Ciências Exatas - PPGECE - Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, UNIVATES, Brasil.

Júlio Panzera Gonçalves - Doutor em Ciências pela Universidade Federal de Minas Gerais

Luan Brenner da Costa - Editor Independente - Graduado em Enfermagem pela Fundação Herminio Ometto

Lucas Matheus Araujo Bicalho - Mestrando em Historia pela Universidade Estadual de Montes Claros, UNIMONTES, Brasil.

Lucas Pereira Gandra - Doutor em Educação em Ciências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Luciano Victor da Silva Santos - Mestrando em Hotelaria e Turismo pela Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Brasil.

Luís Paulo Souza e Souza - Doutor em Saúde Pública pela Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Brasil.

Luzia Eleonora Rohr Balaj - Doutoranda em Música pela Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

Magno Fernando Almeida Nazaré - Mestre em Educação Profissional e Tecnológica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão

Maickon Willian de Freitas - Mestre em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Maikon Luiz Mirkoski - Mestre Profissional em Matemática em Rede Nacional pela Universidade Estadual de Ponta Grossa

Mailson Moreira dos Santos Gama - Doutorando em História pela Universidade Federal de Minas Gerais

Marcela da Silva Melo - Mestre em Avaliação de Políticas Públicas pela Universidade Federal do Ceará

Marcos Scarpioni - Doutorando em Ciência da Religião pela Universidade Federal de Juiz de Fora

Marilha da Silva Bastos - Mestranda em Educação Brasileira pela Universidade Federal do Ceará

Mario Marcos Lopes - Doutorando em Educação pela Universidade Federal de São Carlos

Mateus Henrique Dias Guimarães - Mestre em Enfermagem na Atenção Primária à Saúde pela Universidade do Estado de Santa Catarina

Mirna Liz da Cruz - Editora Independente - Graduada em Odontologia pela Universidade Federal de Goiás

Newton Ataíde Meira - Mestrando em Desenvolvimento Social pela Universidade Estadual de Montes Claros

Osorio Vieira Borges Junior - Doutorando em História pela Universidade Federal de Minas Gerais

Pedro Carlos Refkalefsky Loureiro - Doutorando em Comunicação, Cultura e Amazônia pela Universidade Federal do Pará, UFPA, Brasil.

Plinio da Silva Andrade - Mestrando em Ciências da Educação pela Universidade Leonardo Da Vinci

Priscila da Silva de Souza Bertotti - Editora Independente - Graduada em Biomedicina pelo Centro Universitário UniOpet

Rafael José Kraisch - Doutorando em Neurociências pela Universidade Federal de Santa Catarina

Rita de Cássia de Almeida Rezende - Doutoranda em Educação pela Universidade Católica de Brasília

Rodrigo de Souza Pain - Doutor em Desenvolvimento, Agricultura e Sociedade pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Rodrigo Oliveira Miranda - Doutor em Administração de Empresas pela Universidade de Fortaleza

Rogério de Melo Grillo - Doutor em Educação Física pela Universidade Estadual de Campinas

Ryan Dutra Rodrigues - Editor Independente - Graduado em Psicologia pelo Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas

Salatíel Elias de Oliveira - Doutor em Apostilamento de Reconhecimento de Título pela Universidade do Oeste Paulista

Sebastião Lacerda de Lima Filho - Doutorando em Medicina Translacional pela Universidade Federal do Ceará

Silvio de Almeida Junior - Doutor em Promoção de Saúde pela Universidade de Franca

Swelen Freitas Gabarron Peralta - Doutoranda em Educação pela Universidade Tuiuti do Paraná

Talita Benedcta Santos Künast - Doutoranda em Biodiversidade e Biotecnologia pela Universidade Federal de Mato Grosso

Tályta Carine da Silva Saraiva - Mestra em Agronomia pela Universidade Federal do Piauí

Thiago Giordano de Souza Siqueira - Doutor em Ciência da Informação pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Thiago Silva Prado - Doutor em Educação pela Universidade Estadual de Maringá

Valquíria Velasco - Doutora em História Comparada pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil.

Victor José Gumba Quibutamene - Mestrando em Letras pela Universidade Federal do Rio Grande, FURG, Brasil.

Vinicius Valim Pereira - Doutor em Zootecnia pela Universidade Estadual de Maringá, UEM, Brasil.

Wilson Moura - Doutor em Psicologia pela Christian Business School

Yohans de Oliveira Esteves - Doutor em Psicologia pela Universidade Salgado de Oliveira

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

Caminhos da pesquisa multidisciplinar [livro eletrônico] / organização Aurum Editora. --
1. ed. -- Curitiba, PR : Aurum Editora, 2025.
PDF

Vários autores.

Bibliografia.

ISBN 978-65-83849-18-2

1. Interdisciplinaridade 2. Multidisciplinaridade
3. Pesquisa científica

25-310396.0

CDD-001.42

Índices para catálogo sistemático:

1. Conhecimento científico 001.42

Eliete Marques da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9380

Aurum Editora Ltda
CNPJ: 589029480001-12
contato@aurumeditora.com
(41) 98792-9544
Curitiba - Paraná

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Aurum Editora DECLARA, para fins de direitos, obrigações e aspectos legais ou metodológicos, que:

Esta publicação representa apenas uma transferência temporária dos direitos autorais, conferindo o direito de publicação e reprodução dos materiais. A Editora não assume responsabilidade pela autoria dos manuscritos publicados, conforme as disposições da Lei de Direitos Autorais (Lei 9610/98), do art. 184 do Código Penal e do art. 927 do Código Civil. O(s) autor(es) são exclusivamente responsáveis por garantir a conformidade com as questões de direitos autorais e outros aspectos legais, isentando a Editora de quaisquer responsabilidades civis, administrativas ou criminais que possam ocorrer.

Autoriza-se a **DIVULGAÇÃO DO TRABALHO** pelo(s) autor(es) em palestras, cursos, eventos, programas de mídia e televisão, desde que o devido reconhecimento da autoria e edição seja dado, sem fins comerciais, e que os **CRÉDITOS** à Aurum Editora sejam devidamente apresentados. A omissão ou exclusão dessas informações será de responsabilidade do(s) autor(es) e da editora.

Todos os e-books são de acesso aberto, portanto, não devem ser vendidos em sites, plataformas de comércio eletrônico ou qualquer outro meio, seja virtual ou físico. Assim, não há transferência de direitos autorais para os autores, uma vez que o formato não gera outros direitos além dos usos didáticos e publicitários da obra, a qual pode ser acessada a qualquer momento.

Todos os membros do Conselho Editorial atuam de forma voluntária, sendo graduados ou pós-graduados em suas respectivas áreas.

A Aurum Editora não autoriza a venda ou compartilhamento dos nomes, e-mails e quaisquer outros dados pessoais dos autores, exceto para a divulgação desta obra, em conformidade com o Marco Civil da Internet, a Lei Geral de Proteção de Dados e a Constituição da República Federativa.

DECLARAÇÃO DO AUTOR

O autor deste trabalho DECLARA, para os fins seguintes, que:

Não possui nenhum interesse comercial que possa gerar conflito em relação ao conteúdo publicado;

Declara ter se envolvido ativamente na elaboração do manuscrito, preferencialmente nas seguintes etapas: Desenvolvimento do estudo, e/ou coleta de dados, e/ou análise e interpretação dos dados, redação do artigo ou revisão para garantir a relevância intelectual do material e aprovação final do manuscrito para envio;

Certifica que o texto publicado está completamente livre de dados falsificados ou resultados fraudulentos, bem como de falhas relacionadas à autoria;

Confirma que fez a citação correta e a devida referência a todos os dados e interpretações oriundas de outras pesquisas;

Reconhece que todas as fontes de financiamento que possam ter sido recebidas para a realização da pesquisa foram devidamente declaradas;

Autoriza a edição do trabalho, incluindo registros de catálogo, ISBN, DOI e outros indexadores, design gráfico e criação de capa, layout interno, além do lançamento e divulgação de acordo com os critérios estabelecidos pela Aurum Editora.

AUTORES

Alan da Silva Carneiro
Aline Francieli da Silva Duarte
Alzenira da Rosa Abaide
Anatercia Ferreira Alves
Andressa Santana Batista
Carina Alexandra Rodrigues dos Reis
Carlos Malan de Souza Fonseca Júnior
Carlos Mariano de Souza Rocha Neto
Christian Douglas Oliveira Araújo
Cristiane Matos da Silva
Daniel Carlos Machado
Daniel Duarte Costa
Daniela Souza Ferreira
Danielle Marçal Vilameá de Souza
Deborah Heloise Fernandes Machado
Diego Sebastian Carvalho de Souza
Douglas Carvalho Cordeiro
Edmilson Miranda de Moura
Edna Margarita Pardo Prieto
Eliomar de Jesus Santos
Elisabete dos Santos Silva
Elói Portela Nunes Neto
Fernanda Maria Tischner Duarte
Gabriel Mateus Silva Leite
Giseli Aparecida Borsati Colombo
Ingrid Beatriz Campanha

Isaque Pinho dos Santos
Jean Cláudio Santos Costa
Jeferson Vitorino dos Santos
João Paulo Elias Oliveira
Joelson Lopes da Paixão
Jonathan dos Santos Viana
Juan David Álvarez Muñoz
Laura Vitória Perocco
Leanne Teles Pereira
Liliana Cecilia Pardo Prieto
Lorena Maia da Silva
Lorena Moran Bombonato
Lucas Ulisses Rovigatti Chiavelli
Márcio Harrison dos Santos Ferreira
Mario Augusto Tremante
Mauro José Araujo de Melo
Natan André de Jesus
Patrícia Ferreira Cunha Sousa
Pelrry da Silva Costa
Renilma Carvalho Sousa
Rose Cristina Veiga
Ruth de Abreu Araújo
Silvana Maria Aparecida Viana Santos
Thiago Sebastian Carvalho de Souza
Wilson Araújo da Silva

SUMÁRIO

Capítulo 1

GERMINAÇÃO, DESENVOLVIMENTO INICIAL E EFEITO DA ADUBAÇÃO FOLIAR NOS ASPECTOS MORFOFISIOLÓGICOS DA CASTANHA DO MARANHÃO

Jonathan dos Santos Viana, Daniela Souza Ferreira, Daniel Duarte Costa, Daniel Carlos Machado, Leanne Teles Pereira, Ruth de Abreu Araújo, Anatercia Ferreira Alves, Patrícia Ferreira Cunha Sousa, Wilson Araújo da Silva e Cristiane Matos da Silva.

  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-001>

1-15

Capítulo 2

ALGORITMOS GENÉTICOS NA ENGENHARIA ELÉTRICA

Joelson Lopes da Paixão e Alzenira da Rosa Abaide.

  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-002>

16-24

Capítulo 3

REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES – SMART GRIDS

Joelson Lopes da Paixão e Alzenira da Rosa Abaide.

  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-003>

25-35

Capítulo 4

SEGURANÇA NA INTERNET DAS COISAS: UM ESTUDO AVALIATIVO SOBRE VULNERABILIDADES E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO

Carlos Mariano de Souza Rocha Neto, Elói Portela Nunes Neto, Alan da Silva Carneiro e Mauro José Araujo de Melo.

  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-004>

36-49

Capítulo 5

ARQUITETURA SEGURA PARA IOT NA SAÚDE: INTEGRAÇÃO DE CRIPTOGRAFIA HOMOMÓRFICA, BLOCKCHAIN E IA NA ERA DA SAÚDE 4.0

Alan da Silva Carneiro, Elói Portela Nunes Neto, Carlos Mariano de Souza Rocha Neto e Mauro José Araujo de Melo.

  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-005>

50-76

Capítulo 6

DARK PATTERNS EM INTERFACES DIGITAIS: REVISÃO CRÍTICA SOBRE TIPOLOGIAS, IMPACTOS E REGULAÇÃO ÉTICO-LEGAL

Elói Portela Nunes Neto, Carlos Mariano de Souza Rocha Neto, Alan da Silva Carneiro e Mauro José Araujo de Melo.

  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-006>

77-94

Capítulo 7

APLICAÇÃO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA NA EDUCAÇÃO 5.0: PERSONALIZAÇÃO DA APRENDIZAGEM E DESENVOLVIMENTO SOCIOEMOCIONAL EM AMBIENTE ESCOLAR

Natan André de Jesus e Jeferson Vitorino dos Santos.

  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-007>

.....95-100

Capítulo 8

COMPETÊNCIAS SOCIOEMOCIONAIS COMO PROMOTORAS DE BEM-ESTAR PSICOLÓGICO NO AMBIENTE ESCOLAR

Rose Cristina Veiga, Andressa Santana Batista, Edna Margarita Pardo Prieto, Elisabete dos Santos Silva, Giseli Aparecida Borsati Colombo, Eliomar de Jesus Santos, Isaque Pinho dos Santos, Carlos Malan de Souza Fonseca Júnior, Liliana Cecilia Pardo Prieto e Juan David Álvarez Muñoz.

  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-008>

.....101-112

Capítulo 9

GAMIFICAÇÃO COMO ESTRATÉGIA PARA REDUZIR ANSIEDADE E AUMENTAR ENGAJAMENTO ACADÊMICO

Silvana Maria Aparecida Viana Santos, Márcio Harrison dos Santos Ferreira, Edna Margarita Pardo Prieto, Elisabete dos Santos Silva, João Paulo Elias Oliveira, Eliomar de Jesus Santos, Gabriel Mateus Silva Leite, Christian Douglas Oliveira Araújo, Isaque Pinho dos Santos e Douglas Carvalho Cordeiro.

  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-009>

.....113-125

Capítulo 10

OXIDAÇÃO AERÓBICA DE ÁLCOOIS CATALIZADA POR OURO E PALÁDIO SUPORTADOS EM ÓXIDO DE CÉRIO (CeO₂): UMA REVISÃO DE ESCOPO

Renilma Carvalho Sousa, Pelrry da Silva Costa, Jean Cláudio Santos Costa e Edmilson Miranda de Moura.

  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-010>

.....126-149

Capítulo 11

O USO DE CÉLULAS-TRONCO EM TERAPIAS VETERINÁRIAS REGENERATIVAS

Mario Augusto Tremante.

  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-011>

.....150-159

Capítulo 12

GERENCIAMENTO E CONTROLE DA QUALIDADE APLICADOS À ENGENHARIA DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS: UMA ABORDAGEM BASEADA NO GUIA PMBOK

Diego Sebastian Carvalho de Souza, Thiago Sebastian Carvalho de Souza e Danielle Marçal Vilameá de Souza.

  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-012>

.....160-176

Capítulo 13

BIOFUNCIONALIDADE E MECANISMOS IMUNOMODULADORES DE PROTEÍNAS ATIVAS E CITOCINAS: UMA REVISÃO SOBRE ESTRUTURA, PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E IMPACTOS NA SAÚDE HUMANA

Deborah Heloise Fernandes Machado, Lorena Maia da Silva, Lorena Moran Bombonato, Aline Francieli da Silva Duarte, Ingrid Beatriz Campanha, Laura Vitória Perocco, Fernanda Maria Tischner Duarte, Carina Alexandra Rodrigues dos Reis e Lucas Ulisses Rovigatti Chiavelli.

  <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-013>

.....177-191

GERMINAÇÃO, DESENVOLVIMENTO INICIAL E EFEITO DA ADUBAÇÃO FOLIAR NOS ASPECTOS MORFOFISIOLÓGICOS DA CASTANHA DO MARANHÃO**GERMINATION, INITIAL DEVELOPMENT AND EFFECT OF FOLIAR FERTILIZATION ON THE MORPHOPHYSIOLOGICAL ASPECTS OF MARANHÃO NUT** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-001>**Jonathan dos Santos Viana**

Doutor em Agronomia (Ciência do Solo)
UEMASUL/Campus Imperatriz
E-mail: jonathan.viana@uemasul.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4734-9843>

Daniela Souza Ferreira

Doutora em Ciência de Alimentos
UFMA/Campus Bom Jesus
E-mail: eng.dsf@gmail.com

Daniel Duarte Costa

Doutor em Biotecnologia
UFMA/Campus Bom Jesus
E-mail: daniel.dc@ufma.br

Daniel Carlos Machado

Doutorando em Agronomia (Ciência do Solo)
UNESP/Campus Jaboticabal
E-mail: daniel.c.machado@unesp.br

Leanne Teles Pereira

Mestre em Ciências Florestais e Ambientais
UEMASUL/CCA
E-mail: leanne.pereira@uemasul.edu.br

Ruth de Abreu Araújo

Doutora em Produção Vegetal
UEMASUL/CCA
E-mail: rutha.araujo@uemasul.edu.br

Anatercia Ferreira Alves

Doutora em Fitotecnia – Biotecnologia e Melhoramento de Plantas
UEMASUL/Campus Imperatriz
E-mail: anatercia@yahoo.com.br

Patrícia Ferreira Cunha Sousa

Doutora em Agronomia - Genética e Melhoramento de Plantas
UEMASUL/ Campus Imperatriz
E-mail: patricia.sousa@uemasul.edu.br

Wilson Araújo da Silva

Doutor em Agronomia
UEMASUL/Campus Imperatriz
E-mail: wilson@uemasul.edu.br

Cristiane Matos da Silva

Doutora em Ciência e Tecnologia Ambiental
UEMASUL/Campus Imperatriz
E-mail: cristiane.silva@uemasul.edu.br

RESUMO

A castanha-do-Maranhão configura-se como uma espécie nativa com alta viabilidade de uso em diferentes formas. É empregada na arborização da cidade de Imperatriz – MA, na produção de sabão e, mais recentemente, na elaboração de chocolate. Apesar de sua relevância, ainda há poucas informações sobre o início da produção, aspectos morfológicos e a germinação das sementes. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a germinação, o desenvolvimento inicial e a resposta à adubação foliar no cultivo da castanha-do-Maranhão. Foram realizados dois experimentos subsequentes. No primeiro, avaliou-se a germinação de sementes em solo com pH ácido; no segundo, aplicou-se bioestimulante associado à adubação foliar, em delineamento de blocos ao acaso, com 10 repetições. Os resultados indicaram que a germinação iniciou no 8º dia após a semeadura (DAS) e se estabilizou no 10º DAS, alcançando 98% de germinação. As plântulas apresentaram valores médios de altura, comprimento do epicótilo, hipocótilo, raiz, diâmetro do caule e massa fresca total de 11,82 cm, 5,12 mm, 8,50 mm, 6,64 cm, 3,0 mm e 6,4 g, respectivamente. No segundo experimento, observou-se que o tratamento com bioestimulante foi o mais expressivo, promovendo maior ganho em clorofila total, número de folhas e diâmetro do caule em relação à testemunha. Conclui-se que sementes de castanha-do-Maranhão apresentam boa adaptabilidade e germinação em condição de solo ácido. Além disso, a aplicação foliar de bioestimulante associado à presença de aminoácidos essenciais, pode intensificar a atividade fotossintética, favorecendo o acúmulo de massa foliar e o incremento no diâmetro do caule.

Palavras-chave: *Paqira aquática*; Desenvolvimento inicial; Atividade fotossintética.

ABSTRACT

The Brazil nut is a native species with high viability of use in different forms. It is used in the afforestation of the city of Imperatriz – MA, in the production of soap and, more recently, in the elaboration of chocolate. Despite its relevance, there is still little information about the beginning of production, morphological aspects and seed germination. In this context, the present study aimed to evaluate the germination, initial development and response to foliar fertilization in the cultivation of Maranhão nut. Two subsequent experiments were carried out. In the first, seed germination in soil with acidic pH was evaluated; in the second, a biostimulant was applied associated with foliar fertilization, in a randomized block design, with 10 replications. The results indicated that germination started on the 8th day after sowing (DAS) and stabilized on the 10th DAS, reaching 98% germination. The seedlings showed mean values of height, epicotyl length, hypocotyl, root, stem diameter and total fresh mass of 11.82 cm, 5.12 mm, 8.50 mm, 6.64 cm, 3.0 mm and 6.4 g, respectively. In the second experiment, it was observed that the treatment with biostimulant was the most expressive, promoting greater gain in total chlorophyll, number of leaves and stem diameter in relation to the control. It was concluded that Maranhão nut seeds have good adaptability and germination under acidic soil conditions. In addition, the foliar application of a biostimulant associated with the presence of essential amino acids can intensify photosynthetic activity, favoring the accumulation of leaf mass and the increase in stem diameter.

Keywords: *Paqira aquática*; Early development; Photosynthetic activity.

1 INTRODUÇÃO

A *Pachira aquatica* Aubl. é espécie arbórea de utilização múltipla, reconhecida por seu valor ecológico, ornamental e econômico. Sua importância deriva do aproveitamento de suas sementes comestíveis, do óleo de elevado teor extraído delas, de sua madeira leve e aplicação ornamental, bem como de seu papel em sistemas agroflorestais e programas de recuperação de áreas degradadas (Repositorio-Unesp, 2018). Compreender os fatores que influenciam a germinação e o estabelecimento inicial de *P. aquatica* é imprescindível para garantir a produção de mudas vigorosas, com elevado potencial de sobrevivência e desempenho em viveiros e em plantios de campo.

Estudos anteriores demonstram que *P. aquatica* apresenta germinação epígea e fânerocotiledonar, iniciando-se em torno do 8º dia após a semeadura e podendo estender-se até aproximadamente o 15º dia, sob condições adequadas de sementeira (Silva et al., 2012). Em outro estudo, em zona úmida do sudeste mexicano, *P. aquatica* obteve taxas de germinação superiores a 86%, sendo descrita a germinação como criptocotiledonar hipogeal, o que evidencia a variabilidade em função de fatores ambientais e tratamentos (Cabrera-Tórres et al., 2010).

Além disso, sementes de *P. aquatica* são caracterizadas como recalcitrantes, ou seja, com alta umidade inicial e sensibilidade à dessecação, o que impõe desafios ao armazenamento e à manutenção da qualidade fisiológica durante períodos prolongados fora da planta-mãe. Em estudo de dessecação, verificou-se que, após 24 horas de secagem a 35 °C, houve queda no teor de água das sementes, seguida de redução em parâmetros como início de germinação, taxa de germinação e crescimento de plântulas, indicando níveis críticos para perda de viabilidade (Rodrigues et al., 2019).

O desenvolvimento inicial de mudas envolve não apenas características morfológicas (altura, diâmetro do caule, número de folhas, área foliar, massa seca), mas também parâmetros fisiológicos que definem capacidade fotossintética, eficiência no uso da água, conteúdo de clorofila, relações folha/raiz, entre outros, os quais determinam o vigor e a adaptabilidade das plantas em viveiro e no campo. Em *P. aquatica*, foi observado que concentrações de rejeito de mineração de cobre no solo afetam negativamente o desenvolvimento inicial, reduzindo altura, diâmetro, número de folhas e índice de clorofila, bem como massa seca aérea e radicular, em comparação com controle (Costa, 2022).

A adubação foliar é uma prática que pode complementar a nutrição de plantas, especialmente nos estágios iniciais de desenvolvimento, atuando rapidamente sobre deficiências nutricionais e influenciando de modo direto variáveis fisiológicas, como teor foliar de nutrientes, taxas de fotossíntese, eficiência fotossintética e produção de biomassa. No entanto, até onde se sabe, não há estudos publicados específicos investigando os efeitos da adubação foliar em *Pachira aquatica* durante a germinação e estabelecimento inicial, avaliando conjuntamente atributos morfofisiológicos.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar a germinabilidade, o desenvolvimento inicial

e os efeitos da adubação foliar nos aspectos morfofisiológicos de *Pachira aquatica*. Os resultados esperados podem contribuir a preencher lacunas de conhecimento e fornecer subsídios técnicos para uso sustentável da espécie em viveiros, restauração ambiental e programas agroflorestais.

2 METODOLOGIA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido na Universidade Federal do Maranhão/ UFMA Campus Bom Jesus, em Imperatriz, Maranhão, Brasil, em dois momentos distintos. No primeiro momento foram realizados testes de germinação de sementes de castanha do Maranhão em solo classificado como NEOSSOLO Quartzarênio, com pH de 4,5, e a segunda parte do experimento se deu com a implantação de mudas no campo experimental da UFMA/Imperatriz onde solo onde o solo foi classificado como ARGISSOLO acinzentado, conforme a classificação da Embrapa (1999). O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é do tipo Aw, tropical com precipitação média anual de 1.221 mm e temperatura média anual de 27,1 °C.

O solo da área experimental do UFMA Campus Bom Jesus apresentou: pH = 4,5; Ca = 1,2 cmol_c/dm⁻³; Mg = 0,4 cmol_c/dm⁻³; Al = 0,10 cmol_c/dm⁻³; H + Al = 3,1 cmol_c/dm⁻³; CTC = 4,89 cmol_c/dm⁻³; P (mehlich I) = 1,8 cmol_c/dm⁻³; K = 0,191 cmol_c/dm⁻³; S = 5 mg/dm⁻³; Matéria orgânica = 1,5 %; Saturação Al = 5,3%; V% = 36,6 %; Ca/Mg = 3,0 %. A análise física do solo constatou teores de 23; 11 e 66% para argila, silte e areia, respectivamente.

2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

Para avaliações iniciais de germinação e de plântulas foram semeadas 30 sementes de castanha do maranhão em bandeja contendo solo arenoso e elevada acidez, pH 4,5. A germinação das sementes aconteceu quando se observou o rompimento do tegumento e emissão da raiz primária. Esse processo se deu ao 7º dia após semeadura (DAS) e se encerrou no 10º DAS, com as plântulas desenvolvida com caulículo e cotilédones acima do solo. Selecionou-se 14 plântulas para avaliações morfológicas.

Na segunda parte do experimento, utilizou-se o delineamento em blocos ao acaso, com 4 tratamentos e 10 repetições. Os tratamentos consistiram na aplicação foliar de nutrientes, sendo: T1: Micronutriente Boro; T2: Boro + Bioestimulante Protemax; T3: Testemunha e T4: Bioestimulante.

2.3 INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Para realização do experimento I, foram coletadas sementes de castanha do maranhão maduras fisiologicamente na cidade de Imperatriz, Maranhão. A coleta se fez necessária, tendo em vista que na região não existe cultivo comercial dessa cultura, mas por ser bem estrondosa, na cidade de Imperatriz

ainda se tem registros de algumas árvores que foram impostas para arborização do centro da cidade. A rega da bandeja com mudas se deu diariamente, com aplicação de 300 mL de água, afim de evitar lixiviação e encharcamento do solo. Essa primeira etapa encerrou-se ao 10º DAS, quando as plântulas já começaram a apresentar um folíolo verdadeiro.

A segunda etapa do experimento se deu pela delimitação de uma área de 282 m², onde inicialmente coletou-se amostras de solos numa profundidade de 0-0,20 m, para fins de fertilidade e análise física. Além disso, foram feitas covas com dimensões de 40 x 40 x 40 cm para pleno desenvolvimento das mudas. Como o pH do solo encontrava-se ácido fez-se necessária a correção do solo por meio da calagem. Foi aplicado calcário dolomítico com PRNT (Percentual de Relativo de Neutralização Total) de 100%, na dosagem de 674 kg/ha. Para melhor eficiência da correção do solo, a calagem foi feita *in loco*, diretamente na cova de plantio. Após a aplicação do calcário e a correção da acidez do solo, foi aguardado um período de 30 dias antes da implantação das mudas no campo experimental. Esse intervalo permitiu a completa reação do calcário no solo, assegurando condições adequadas para o crescimento das plantas.

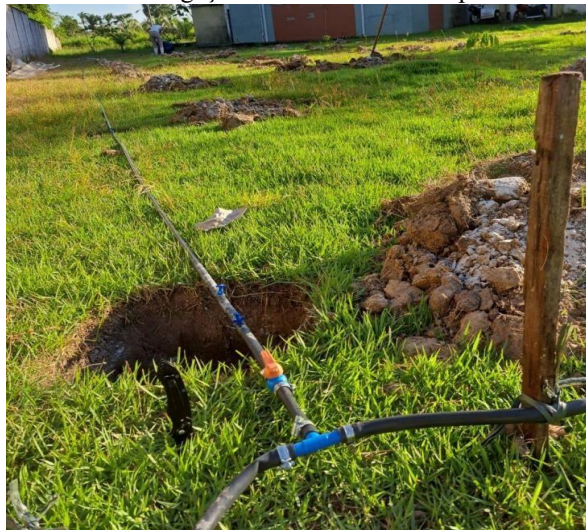
Devido o lençol freático ser próximo a superfície do solo, optou-se pela escolha do sistema de irrigação localizada por gotejamento, visto sua maior eficiência de aplicação de água, bem como menor intensidade, sendo fácil o controle da água aplicada por dia.

Para melhorar o desempenho da irrigação, utilizou-se gotejadores *inline* adicionando-se 2 unidades por planta. A irrigação foi controlada por um temporizador digital (Figura 1), programado para fornecer água por 40 minutos diariamente, no período da manhã e 40 min no período da tarde.

Após a instalação do sistema de irrigação, as mudas foram transplantadas para as covas, acompanhadas da adubação, que incluiu ureia (44% N), superfosfato simples (18% P₂O₅) e cloreto de potássio (60% K₂O). Essa adubação seguiu as Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará (cultura do cacau). Com o objetivo de promover um melhor desenvolvimento radicular, foi aplicada Turfa Gold para estimular o crescimento das raízes.

Após o estabelecimentos das mudas no campo (3 meses após transplântio), foi realizada a aplicação de adubos foliares afim de se determinar o efeito sobre o desempenho agrônômico de plantas de castanha do Maranhão.

Figura 1. Calagem, abertura de cova e irrigação instalada na área experimental de Castanha do Maranhão.



Fonte: Viana (2024)

2.4 VARIÁVEIS ANALISADAS

No décimo dia após a semeadura (10 DAS), as plântulas foram cuidadosamente extraídas do substrato e submetidas à lavagem com água corrente para remoção completa dos resíduos de solo. Posteriormente, foram realizadas avaliações morfológicas detalhadas, incluindo: porcentagem de germinação (%); altura total das plântulas (cm plântula^{-1}); comprimento do epicótilo e do hipocótilo (cm plântula^{-1}); diâmetro do caulículo (mm plântula^{-1}) e massa fresca total (g), com o intuito de caracterizar o desenvolvimento inicial das plantas.

No experimento II Aos 35 dias após a aplicação dos fertilizantes foliares, foram realizadas as avaliações das plantas. As variáveis analisadas incluíram a determinação do teor de clorofila nos terços superior, médio e inferior da planta, o número de folhas e o diâmetro do caule. O teor de clorofila foi realizado por meio da leitura com uso do equipamento SPAD às 15 h em 3 folhas da mesma planta em diferentes posições. O número de folhas foi determinado por meio da contagem total por planta. E diâmetro do caule foi mensurado com uso de paquímetro digital.

Figura 2. Determinação do teor de clorofila total e diâmetro do caule da planta de Castanha do Maranhão.



Fonte: Viana (2024)

Caminhos da Pesquisa Multidisciplinar

2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise de variância (ANOVA) foi realizada separadamente, assumindo distribuição normal dos dados, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey (p -valor $< 0,05$), utilizando-se o software Agroestat, versão 1.0 (Barbosa; Maldonado Júnior, 2015).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 EXPERIMENTO I

Os resultados do presente estudo permitiram observar um satisfatório desempenho no desenvolvimento inicial das plântulas de *Pachira aquatica* provenientes do Maranhão. A taxa de germinação da *Pachira aquatica* foi de 98%, demonstrando uma alta viabilidade das sementes usadas, o que expressa de maneira positiva, tanto a qualidade fisiológica do material propagativo, quanto as condições do teste de germinação. Esse valor é superior ao reportado para espécies florestais em geral, as espécies tropicais, muitas vezes, exibem baixas taxas germinativas, em torno de 85%, por causa da dormência ou viabilidade ou da baixa qualidade de sementes ou mesmo de condições deficitárias do ambiente.

Tabela 1. Germinação e desenvolvimento de plântulas de castanha do maranhão em solo ácido.

G (%)	AP (cm)	CR (cm)	CE (cm)	CH (cm)	DC (mm)	MFT (g)
98	11,82	6,64	5,12	8,50	3,00	6,4

G: germinação; AP: altura de plântulas; CR: comprimento de raiz; CE: comprimento do epicótilo; CH: comprimento do hipocótilo; DC: diâmetro do caule; MFT: massa fresca total. Valores médios referente a 14 plântulas de uma amostra total de 30 plântulas.

A altura média das plântulas (AP), de 11,82 cm, indica um desenvolvimento aéreo vigoroso, sendo este um indicador importante da adaptação inicial da planta ao ambiente. Esse valor, aliado ao comprimento do epicótilo (CE = 5,12 cm) e do hipocótilo (CH = 8,50 cm), revela um bom equilíbrio entre as estruturas que sustentam a parte aérea, conferindo estabilidade e favorecendo a fotossíntese nas fases iniciais do crescimento. O hipocótilo, notavelmente mais longo que o epicótilo, pode estar associado à estratégia da planta em elevar rapidamente a plântula acima da superfície do solo, minimizando os efeitos de sombreamento e competição por luz, especialmente em ambientes tropicais úmidos onde a densidade de vegetação é elevada.

O comprimento médio da raiz – CR = 6,64 cm. Isso talvez demonstre um crescimento radicular proporcional ao crescimento da parte aérea e aponte para o equilíbrio dos recursos alocados para os sistemas radiculares e aéreos. É de importância prática para garantir o grau estável da planta e seu alto desempenho funcional no fluxo de absorção de água e nutrientes, o que é extremamente vital para programas de revegetação e restauração ecológica com o uso de espécies nativas.

Figura 3. Plântulas de castanha do maranhão com 10 dias após semeadura.



Fonte: Viana (2024)

O diâmetro do caule, média 3,00 mm, representa um bom desenvolvimento estrutural das plântulas. Um caule de maior diâmetro permite condições mais robustas e resistentes àquele ambiente, aumentando a resistência mecânica ao suporte de sua parte aérea e a seiva condutibilidade eficiente. Em conjunto com a altura da plântula, DI auxilia na análise da qualidade morfológica da muda, além disso, em estudos de diversos autores, relaciona-se com o desempenho em campo (Gonçalves et al., 2020).

A massa fresca total (MFT), com valor médio de 6,4 g, reflete a biomassa acumulada pelas plântulas e pode ser considerada um indicativo do estado fisiológico e do acúmulo de reservas, especialmente relevante para a sobrevivência após o transplante. Valores elevados de massa fresca geralmente estão relacionados a boa hidratação e vigor das estruturas vegetais.

3.2 EXPERIMENTO II

Com base nas observações realizadas em campo, constatou-se um desenvolvimento vegetativo satisfatório das plantas, resultado direto das práticas de manejo adequadas e das técnicas de cultivo empregadas (Figura 2). O crescimento apresentou um padrão linear, evidenciando uma relação diretamente proporcional entre o acúmulo de biomassa verde e o avanço fenológico das plantas.

Sob o ponto de vista fisiológico, verificou-se que o aumento da área foliar exposta à radiação solar, aliado a condições ambientais favoráveis de temperatura e umidade relativa do ar, promove uma

intensificação da atividade fotossintética. De acordo com Taiz et al. (2017), a taxa fotossintética está diretamente relacionada à eficiência na captação de luz e ao status hídrico da planta, sendo estes fatores determinantes para o crescimento e a produtividade vegetal. Esse incremento na fotossíntese estimula a emissão de novos brotos e ramificações, favorecendo o crescimento vegetativo e o acúmulo de biomassa (Larcher, 2004).

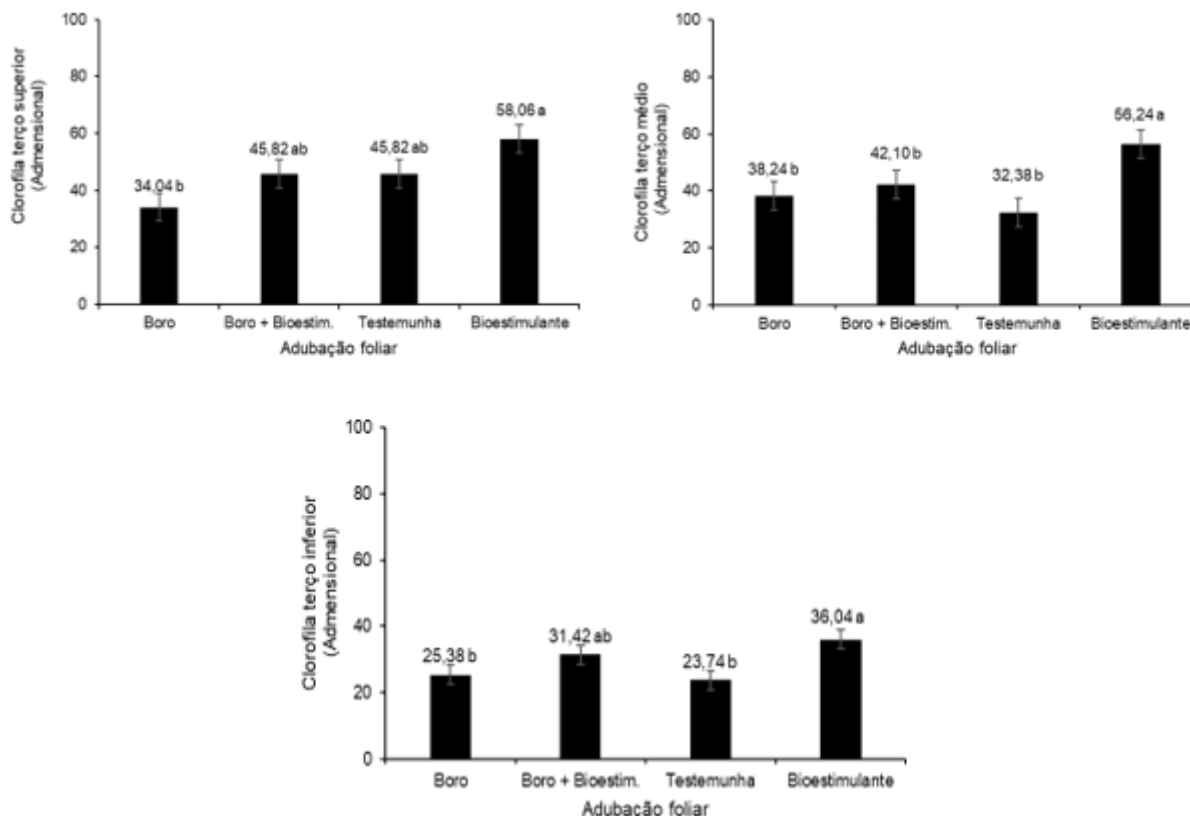
Figura 4 - Demonstração da planta bem desenvolvida.



Fonte: Viana (2024)

A análise de variância (ANOVA) aplicada aos dados de teor de clorofila total nos diferentes estratos da planta (terços superior, médio e inferior) indicou diferenças estatisticamente significativas em função da adubação foliar. Os maiores teores foram registrados no terço superior (58,06), seguido pelo terço médio (56,24), enquanto o terço inferior apresentou os menores valores (36,04), conforme ilustrado na Figura 5. Esses resultados sugerem uma distribuição vertical diferenciada da clorofila na planta, possivelmente associada à maior exposição à radiação solar nas porções superiores da copa, o que favorece a síntese de pigmentos fotossintéticos (Taiz et al., 2017).

Figura 5 – Teor de clorofila total nos terços superior, médio e inferior das folhas de castanha do Maranhão.



Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo Teste de comparação de média de Tukey a 5% de probabilidade.

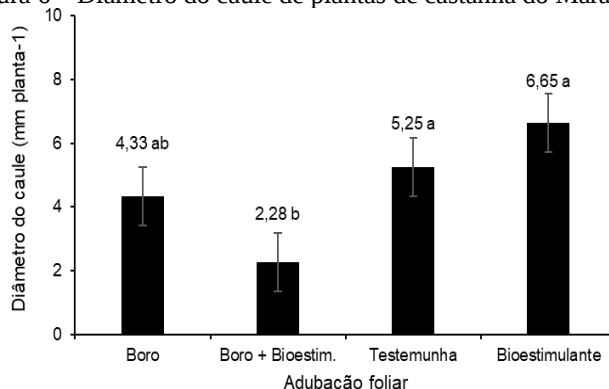
Os teores mais elevados de clorofila total observados no terço superior da planta (58,06), seguidos pelos valores do terço médio (56,24) e inferior (36,04), indicam uma maior capacidade fotossintética nas folhas localizadas nas porções superiores da copa. Esse padrão pode ser atribuído à maior intensidade luminosa incidente sobre essas regiões, uma vez que a clorofila desempenha papel fundamental na captura da luz solar, sendo sua síntese estimulada pela luminosidade adequada. A aplicação da adubação foliar, ao fornecer nutrientes diretamente às folhas, pode potencializar essa resposta, promovendo o acúmulo de pigmentos fotossintéticos (Taiz; Zeiger, 2009).

Adicionalmente, folhas situadas próximas ao ápice da planta tendem a ser morfológicamente mais jovens e fisiologicamente mais ativas, o que favorece a maior concentração de clorofila. Por outro lado, as folhas do terço inferior, geralmente mais antigas e submetidas a sombreamento, apresentam menor demanda fotossintética e, consequentemente, reduzido teor de clorofila, o que justifica os valores inferiores observados nessa região da planta.

Para a variável diâmetro do caule, observou-se diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos avaliados. O menor valor médio foi registrado na adubação com boro associada ao bioestimulante (2,28 mm), enquanto o maior diâmetro foi verificado no tratamento com aplicação foliar contendo exclusivamente o bioestimulante (6,65 mm).

Esses resultados indicam que a utilização isolada do bioestimulante promoveu maior incremento no desenvolvimento estrutural do caule, possivelmente por estimular processos fisiológicos relacionados ao crescimento celular e à divisão meristemática. Por outro lado, a combinação com boro pode ter interferido negativamente na absorção ou utilização dos compostos bioativos, refletindo no menor acúmulo de biomassa nessa variável morfológica.

Figura 6 – Diâmetro do caule de plantas de castanha do Maranhão.



Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo Teste de comparação de média de Tukey a 5% de probabilidade.

A diferença significativa observada no diâmetro do caule entre os tratamentos pode ser atribuída aos distintos efeitos fisiológicos exercidos pelo boro e pelos bioestimulantes sobre o metabolismo vegetal. O boro é um micronutriente essencial, envolvido na integridade da parede celular, na divisão celular e no transporte de açúcares e metabólitos (Goldbach et al., 2001; Barker; Pilbeam, 2007). No entanto, sua associação com bioestimulantes pode induzir efeitos antagônicos, especialmente quando há excesso ou desequilíbrio na dose aplicada. Nessas condições, o boro pode interferir negativamente nos processos fisiológicos, resultando em restrições ao crescimento celular e, conseqüentemente, na redução do diâmetro do caule.

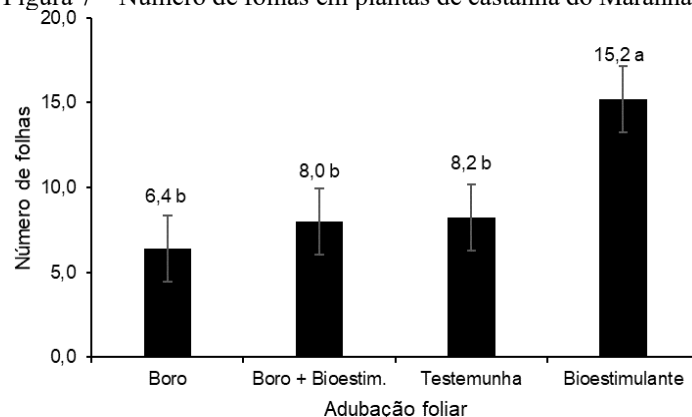
Esse efeito pode estar relacionado à toxicidade induzida ou à alteração no transporte e assimilação de carboidratos, nutrientes e fitohormônios, prejudicando a expansão celular e o acúmulo de biomassa nos tecidos caulinares. Por outro lado, a aplicação isolada do bioestimulante parece ter favorecido a divisão e o alongamento celular, promovendo um maior espessamento do caule.

Por outro lado, a aplicação isolada do bioestimulante favoreceu um crescimento mais vigoroso do caule, refletido no maior diâmetro observado. Esse efeito pode ser atribuído à ação direta dos bioestimulantes sobre o metabolismo vegetal, uma vez que esses produtos são formulados para estimular processos fisiológicos, como a síntese e regulação de fitohormônios — incluindo auxinas, giberelinas e citocininas, os quais desempenham papel fundamental na divisão celular, alongamento e espessamento dos

tecidos caulinares. A ausência de possíveis interações antagônicas com o boro permite que o bioestimulante exerça seus efeitos de forma mais eficiente, resultando em maior desenvolvimento estrutural do caule.

Em relação à variável número de folhas (Figura 7), também foi observada diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos. O tratamento com adubação foliar contendo apenas o bioestimulante apresentou o maior valor médio, com 15,20 folhas por planta. Esse resultado reforça o efeito positivo do bioestimulante sobre o crescimento vegetativo, possivelmente devido à sua influência na ativação de rotas metabólicas associadas à morfogênese e ao desenvolvimento de órgãos aéreos, conforme relatado por Calvo, Nelson e Kloepper (2014).

Figura 7 – Número de folhas em plantas de castanha do Maranhão.



Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo Teste de comparação de média de Tukey a 5% de probabilidade.

Inicialmente, o bioestimulante pode ter promovido um aumento na biossíntese de fitohormônios essenciais, como auxinas e citocininas. As auxinas são amplamente reconhecidas por sua capacidade de estimular a elongação celular e a formação de primórdios foliares, enquanto as citocininas atuam na promoção da divisão celular e da ramificação, processos fundamentais para o desenvolvimento vegetativo (Castro; Vieira, 2001; Silva et al., 2008). O incremento desses hormônios confere à planta maior capacidade de produção e expansão foliar.

Adicionalmente, o bioestimulante pode ter contribuído para a otimização da eficiência fotossintética das folhas. Ao aprimorar a captura e a utilização da radiação luminosa, bem como a assimilação de nutrientes, a planta passa a dispor de maior energia e recursos metabólicos, os quais são indispensáveis para o crescimento e formação de novas folhas. Tal aumento na atividade fotossintética representa um fator determinante para a maior produção foliar observada, corroborando estudos que associam bioestimulantes à melhoria do desempenho fisiológico das plantas (Calvo, Nelson & Kloepper, 2014; Bulgari, Ferrante; Vernieri, 2015).

Outro aspecto relevante refere-se à possível melhoria na absorção e translocação de nutrientes promovida pelo bioestimulante. Ao facilitar a disponibilidade e o transporte de elementos essenciais, o

bioestimulante assegura que as folhas em desenvolvimento recebam os recursos necessários para seu crescimento pleno, contribuindo para o aumento no número de folhas formadas (Du Jardin, 2015; Rouphael; Colla, 2020).

Esses mecanismos integrados demonstram que o uso de bioestimulantes pode ser uma estratégia eficaz para otimizar o crescimento vegetativo, principalmente em condições de estresse ambiental ou solo com baixa disponibilidade de nutrientes, favorecendo o desenvolvimento e a produtividade das plantas.

4 CONCLUSÃO

A castanha-do-Maranhão apresentou elevada taxa de germinação (98%) em solo ácido, demonstrando alta adaptabilidade e vigor inicial. A aplicação foliar de bioestimulante promoveu incremento nos teores de clorofila, no número de folhas e no diâmetro do caule, confirmando seu potencial para otimizar o crescimento vegetativo e a produção de mudas de qualidade, com aplicabilidade em sistemas agroflorestais e programas de restauração ecológica.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. *AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos*. Jaboticabal: FCAV/UNESP, 2015. 396 p.
- BULGARI, R.; FERRANTE, A.; VERNIERI, P. Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Scientia Horticulturae*, v. 196, p. 124–129, 2015.
- CALVO, P.; NELSON, L.; KLOEPPER, J. W. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, v. 383, p. 3–41, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>.
- COSTA, M. A. *Desenvolvimento inicial de Pachira aquatica Aubl. submetida a diferentes concentrações de rejeito de mineração de cobre da mesorregião sudeste paraense*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Parauapebas, 2022. Disponível em: <https://bdta.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/4121>. Acesso em: 26 set. 2025.
- CASTRO, P.R.C.; VIEIRA, E.L. Aplicações de reguladores vegetais na agricultura tropical. Guaíba: Livraria e editora agropecuária, 2001. 132p.
- DU JARDIN, P. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, v. 196, p. 3–14, 2015.
- EMBRAPA. SISTEMA Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.
- GONÇALVES, M. S.; ALMEIDA, L. F.; CARVALHO, J. A. Qualidade de mudas florestais: parâmetros morfológicos e sua relação com o desempenho no campo. *Revista Brasileira de Silvicultura*, v. 44, n. 2, p. 145-158, 2020.
- GOLDBACH, H. E.; YU, Q.; WINGENDER, R.; SCHULZ, M.; WIMMER, M.; FINDEKLEE, P.; BALUSKA, F. Rapid response reactions of roots to boron deprivation. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 164, p. 173–181, 2001.
- LARCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: Rima, 2004.
- MEDEIROS, R. D.; SOUZA, P. H.; LIMA, R. C. Germinação e vigor de sementes de espécies florestais tropicais sob diferentes substratos. *Journal of Seed Science*, v. 40, n. 3, p. 312-320, 2018.
- REPOSITORIO-UNESP. Caracterização do óleo das sementes de *Pachira aquatica* Aubl. para aproveitamento alimentar. UNESP, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/e256a2d6-2aef-41bc-9335-3ba39eb02907/full>. Acesso em: 26 set. 2025.
- RODRIGUES, A. P. D.; SILVA, C. B.; NASCIMENTO, W. M. O. Desiccation of *Pachira aquatica* Aubl. seeds. *Journal of Agricultural Science*, v. 11, n. 4, p. 1-10, 2019. Disponível em: <https://ccsenet.org/journal/index.php/jas/article/view/0/37095>. Acesso em: 26 set. 2025.
- ROUPHAEL, Y.; COLLA, G. *Biostimulants in Horticulture*. Cham: Springer, 2020.

SILVA, K. B.; ALVES, E. U.; MATOS, V. P.; BRUNNO, R.; ALCÂNTARA, R. L. Caracterização morfológica de frutos, sementes e fases de germinação de *Pachira aquatica* Aubl. (Bombacaceae). *Semina: Ciências Agrárias*, v. 33, n. 2, p. 533-540, 2012. Disponível em: https://oasisbr.ibict.br/vufind/Record/UEL-11_1713c6958e6fb24fb1b2a42d801f5687. Acesso em: 26 set. 2025.

SILVA, T. J.; FERREIRA, W. P. M.; NASCIMENTO, R. M. Crescimento inicial de espécies nativas em substratos alternativos: implicações para restauração ecológica. *Revista Árvore*, v. 43, n. 1, p. 1-10, 2019.

SILVA, T. T. A.; PINHO, E. V. R. V.; CARDOSO, D. L.; FERREIRA, C. A.; ALVIM, P. O.; COSTA, A. A. F. Qualidade fisiológica de sementes de milho na presença de bioestimulantes. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 32, n. 3, p. 840-846, 2008.

SOUSA, E. M.; OLIVEIRA, C. G.; NASCIMENTO, M. L. Avaliação da germinação e do desenvolvimento de plântulas de espécies nativas da Amazônia. *Acta Amazônica*, v. 51, n. 4, p. 345-353, 2021.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia Vegetal*. 3ª ed. Porto Alegre: Artmed. 2009.

ZAMORA-CORNELIO, L. F.; OCHOA-GAONA, S.; VARGAS SIMÓN, G.; CASTELLANOS ALBORES, J.; DE JONG, B. H. J. Germinación de semillas y clave para la identificación de plântulas de seis especies arbóreas nativas de humedales del sureste de México. *Revista de Biología Tropical*, v. 58, n. 2, p. 717-732, 2010.

ALGORITMOS GENÉTICOS NA ENGENHARIA ELÉTRICA**GENETIC ALGORITHMS IN ELECTRICAL ENGINEERING** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-002>**Joelson Lopes da Paixão**

Mestre em Engenharia Elétrica, especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho e em Educação Básica, Tecnológica e EAD

E-mail: joelson.paixao@hotmail.com

Alzenira da Rosa Abaide

Doutora em Engenharia Elétrica, professora titular na UFSM

E-mail: alzenira@ufsm.br

RESUMO

Em face do aumento exponencial da demanda por energia elétrica, impulsionado pelo desenvolvimento tecnológico e pela urbanização acelerada, as técnicas de otimização heurísticas despontam como instrumentos cruciais na engenharia elétrica para promover a eficiência e a sustentabilidade. Este estudo explora os Algoritmos Genéticos (AGs), uma metodologia bioinspirada na evolução darwiniana, destacando sua versatilidade para resolver problemas complexos de otimização que envolvem não linearidades, restrições múltiplas e incertezas estocásticas. Por meio de uma análise teórica aprofundada, discute-se a estrutura conceitual dos AGs, incluindo seus operadores essenciais como seleção, cruzamento e mutação, além de potenciais aplicações em áreas como planejamento de sistemas de potência, controle de dispositivos elétricos, estimação de parâmetros e otimização de redes de distribuição. A literatura especializada evidencia que os AGs superam abordagens convencionais, como métodos determinísticos, em cenários multivariáveis e de alta dimensionalidade, fomentando soluções eficientes, adaptáveis e robustas que contribuem para a redução de custos operacionais e impactos ambientais. Além disso, são abordadas limitações inerentes, como o tempo computacional e a sensibilidade a parâmetros, sugerindo hibridizações com outras meta-heurísticas para aprimoramento.

Palavras-chave: Algoritmos genéticos; Otimização; Sistemas de potência; Engenharia elétrica; Meta-heurísticas.

ABSTRACT

In view of the exponential increase in electricity demand, driven by technological development and rapid urbanization, heuristic optimization techniques have emerged as crucial tools in electrical engineering to promote efficiency and sustainability. This study explores Genetic Algorithms (GAs), a methodology inspired by Darwinian evolution, highlighting their versatility in solving complex optimization problems involving nonlinearities, multiple constraints, and stochastic uncertainties. Through an in-depth theoretical analysis, the conceptual structure of GAs is discussed, including their essential operators such as selection, crossover, and mutation, as well as potential applications in areas such as power system planning, control of electrical devices, parameter estimation, and distribution network optimization. The specialized literature shows that GAs outperform conventional approaches, such as deterministic methods, in multivariable and high-dimensional scenarios, fostering efficient, adaptable, and robust solutions that contribute to reducing operational costs and environmental impacts. Furthermore, inherent limitations, such as computational time and parameter sensitivity, are addressed, suggesting hybridizations with other metaheuristics for improvement.



Keywords: Genetic algorithms; Optimization; Power systems; Electrical engineering; Metaheuristics.

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico e a busca incessante por maior conforto e qualidade de vida impulsionam o crescimento contínuo do consumo de energia elétrica em escala global, demandando inovações constantes por parte das empresas do setor para garantir um suprimento confiável, eficiente e sustentável. De acordo com dados recentes, o consumo mundial de energia elétrica cresceu em média 3% ao ano na última década, com projeções indicando um aumento de até 50% até 2050, impulsionado pela eletrificação de transportes, indústrias e residências (ANEEL, 2008).

Contudo, esse expansionismo acarreta desafios significativos, como o risco de depleção de recursos naturais não renováveis, impactos ambientais adversos – incluindo emissões de gases de efeito estufa – e elevados investimentos em novas infraestruturas de geração, transmissão e distribuição. Na engenharia elétrica, a otimização de recursos emerge como uma estratégia fundamental para mitigar esses problemas, promovendo o uso racional e eficiente da energia sem comprometer o desenvolvimento econômico e social.

Problemas de otimização em sistemas elétricos frequentemente envolvem variáveis interdependentes, restrições não lineares e incertezas estocásticas, tornando métodos tradicionais, como programação linear ou gradiente descendente, inadequados em muitos casos devido à sua suscetibilidade a mínimos locais e à incapacidade de lidar com espaços de busca discretos ou combinatórios (KATOCH; CHAUHAN; KUMAR, 2021).

Nesse contexto, os Algoritmos Genéticos (AGs) despontam como uma ferramenta poderosa, inspirada nos princípios darwinianos de seleção natural, sobrevivência do mais apto e reprodução genética (GOLDBERG, 1989). Desenvolvidos inicialmente por John Holland na década de 1970, os AGs simulam processos evolutivos para explorar soluções ótimas em problemas complexos, oferecendo robustez em cenários onde métodos exatos falham. Este trabalho oferece uma visão teórica abrangente dos AGs, enfatizando sua aplicação genérica na engenharia elétrica, com sugestões de usos práticos em diversos subdomínios, visando fomentar avanços na área e contribuir para uma matriz energética mais sustentável e resiliente.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Na engenharia elétrica, problemas de otimização surgem em diversas subáreas, como o planejamento e a operação de sistemas de potência, nos quais o objetivo é minimizar os custos operacionais totais enquanto se atende à demanda variável de carga e se respeitam restrições físicas e regulatórias (Da Paixao et al., 2023; Paixão et al., 2025). Esses problemas podem ser descritos em termos de funções a serem minimizadas ou maximizadas, considerando limites como a capacidade dos geradores, perdas resistivas nas linhas de transmissão, estabilidade de tensão e incertezas estocásticas associadas tanto à carga quanto à geração de fontes renováveis intermitentes, como a eólica e a solar (ANEEL, 2008).

Um exemplo clássico é o problema de fluxo de potência ótimo (OPF), que busca determinar a alocação mais eficiente da geração elétrica de modo a atender à demanda, respeitando limites de tensão e de ângulos de fase, enquanto minimiza os custos de operação de cada unidade geradora. A complexidade desses problemas aumenta significativamente com a inclusão de elementos estocásticos, como variações na produção de fontes renováveis ou flutuações na demanda, exigindo abordagens robustas capazes de evitar mínimos locais e explorar soluções globais em espaços de busca de alta dimensionalidade (PEDAPENKI; SWATHI, 2017).

Outros desafios incluem o despacho econômico de carga (EDC), que aloca geração entre unidades para minimizar custos sob restrições de rampa e reserva; o planejamento de expansão de redes, que otimiza investimentos em novas linhas e subestações considerando cenários de longo prazo; e o controle de estabilidade transitória, onde se ajustam parâmetros de controladores para mitigar oscilações.

Nesses contextos, a multidimensionalidade, não convexidade e presença de variáveis discretas (como estados de chaves em redes de distribuição) desafiam métodos determinísticos tradicionais, que podem convergir para soluções subótimas ou exigir linearizações aproximadas (BISHT et al., 2021). Os AGs, ao simularem processos evolutivos populacionais, oferecem uma alternativa eficaz para navegar por esses espaços de busca complexos, promovendo diversidade de soluções e adaptabilidade a incertezas reais do sistema elétrico.

3 ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos (AGs), introduzidos por John Holland em 1975, baseiam-se em mecanismos evolutivos naturais para solucionar problemas de otimização, incorporando conceitos como variação genética, seleção e herança (LINDEN, 2008). Fundamentados na teoria darwiniana, os AGs modelam a evolução de populações de soluções candidatas, onde indivíduos mais adaptados ao "ambiente" (definido pela função objetivo) têm maior chance de reproduzir e transmitir traços genéticos, permitindo a exploração de soluções globais em problemas NP-difíceis.

Essa heurística é especialmente útil em problemas multivariáveis e não lineares comuns na engenharia elétrica, onde espaços de busca vastos e irregulares demandam estratégias estocásticas robustas (ALAM et al., 2020). Vantagens incluem a capacidade de lidar com variáveis discretas e contínuas, paralelismo inerente e resistência a mínimos locais, embora desvantagens como alto custo computacional e necessidade de calibre (*tuning*) de parâmetros sejam notadas na literatura.

3.1 CONCEITOS BÁSICOS

Em AGs, soluções potenciais são representadas como cromossomos, estruturas compostas por genes que codificam variáveis do problema – por exemplo, níveis de tensão ou potências geradas em um sistema

elétrico. O genótipo refere-se à codificação abstrata (e.g., binária ou real), enquanto o fenótipo é a interpretação prática no domínio do problema, influenciada pelo ambiente externo. Essa dualidade permite uma abstração flexível, facilitando a aplicação em diversos contextos. A Tabela 1 resume as analogias entre biologia e AGs, destacando como conceitos naturais são adaptados computacionalmente.

Tabela 1 – Correspondência entre Genética Biológica e Algoritmo Genético.

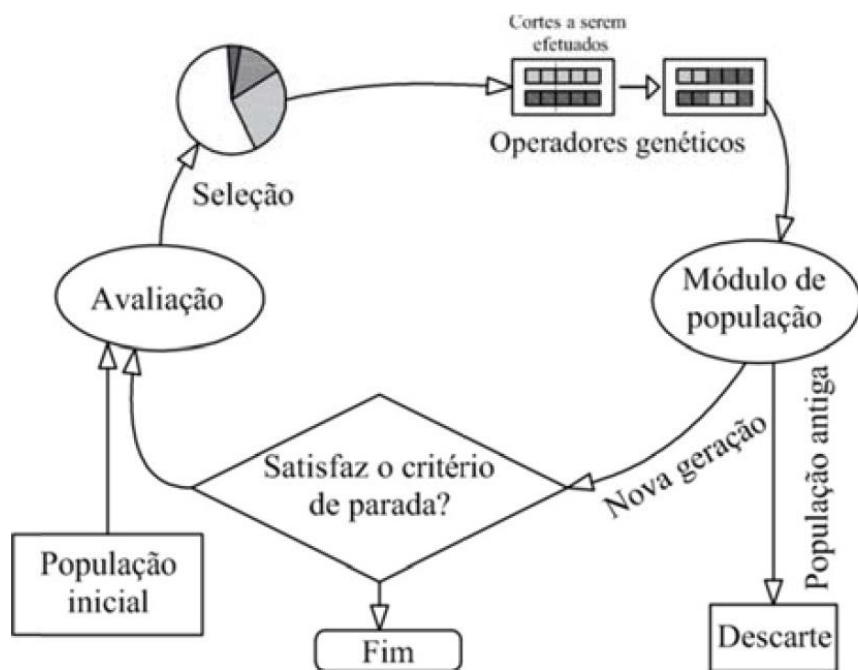
Genética Biológica	Algoritmo Genético
Cromossomo	String, cromossomo
Gene	Característica
Alelo	Valor
Lócus	Posição
Genótipo	Estrutura
Fenótipo	Conjunto de parâmetros

Fonte: Adaptado de LINDEN (2008).

3.2 FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO GENÉTICO

O ciclo de um AG inicia com a criação de uma população inicial aleatória, tipicamente composta por 50 a 200 indivíduos dependendo da complexidade do problema, seguida de iterações evolutivas envolvendo avaliação, seleção, cruzamento, mutação e elitismo, até atender a um critério de parada como número máximo de gerações ou convergência da fitness média. A Figura 1 ilustra esse fluxo iterativo, enfatizando o equilíbrio entre exploração (diversidade) e exploração (intensificação).

Figura 1 – Esquema de um algoritmo genético.



Fonte: Adaptado de LINDEN (2008).

A seguir são listadas as etapas juntamente com as descrições do que ocorre em cada uma:

- **Representação:** Variáveis podem ser codificadas em binário (para problemas discretos como alocação de recursos), real (para variáveis contínuas como ângulos de fase) ou inteiro. Em aplicações elétricas, representações reais são preferíveis para variáveis como tensões ou potências, evitando perda de precisão em discretizações (SOUZA et al., 2006).
- **População Inicial:** Gerada randomicamente para promover diversidade inicial, o tamanho deve equilibrar diversidade genética e custo computacional, evitando convergência prematura em populações pequenas ou sobrecarga em grandes (ISA et al., 2024). Técnicas como inicialização heurística podem ser usadas para acelerar a convergência em problemas elétricos.
- **Avaliação:** A função fitness quantifica a adequação de cada indivíduo, penalizando violações de restrições (e.g., via funções de penalidade Lagrangeanas) e premiando proximidade ao ótimo. Em sistemas elétricos, pode incluir custos de operação, perdas de transmissão e penalidades por instabilidade dinâmica ou violações de limites (PEDAPENKI; SWATHI, 2017).
- **Seleção:** Técnicas como roleta (proporcional à fitness), torneio (comparação randômica) ou ranking favorecem indivíduos com melhor fitness, preservando diversidade para evitar elitismo excessivo (KUMAR et al., 2010).
- **Cruzamento:** Operadores como um-ponto, dois-pontos ou aritmético recombina genes de pais selecionados, gerando descendentes que exploram novas combinações genéticas e potencializam sinergias (ALAM et al., 2020). Taxas típicas variam de 60-90%.
- **Mutação:** Introduz variações aleatórias com baixa probabilidade (1-10%), prevenindo estagnação em mínimos locais e mantendo diversidade genética, essencial em problemas dinâmicos como otimização em tempo real (KATOCH; CHAUHAN; KUMAR, 2021).
- **Elitismo:** Mantém os melhores indivíduos (tipicamente 1-5% da população) na próxima geração, acelerando convergência sem perda de soluções ótimas (GOLDBERG, 1989).
- **Critério de Parada:** Baseado em iterações máximas (e.g., 100-1000), estagnação da melhor fitness por N gerações ou tolerância de erro pré-definida, adaptável a restrições computacionais (LINDEN, 2008).

4 APLICAÇÕES EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Os AGs encontram ampla aplicação na engenharia elétrica, particularmente em otimização de sistemas de potência, onde sua capacidade de lidar com não linearidades e restrições múltiplas os torna superiores a métodos clássicos. Por exemplo, no fluxo de potência ótimo (OPF), AGs minimizam perdas e

custos em redes multibarras, incorporando restrições de segurança e incertezas renováveis, alcançando reduções de até 10% em custos operacionais comparados a abordagens lineares (BISHT et al., 2021).

No despacho econômico de carga (EDC), alocam geração de forma ótima entre unidades térmicas, hidráulicas e renováveis, considerando restrições ambientais como emissões de CO₂ e econômicas como custos variáveis, com estudos demonstrando convergência mais rápida em sistemas de grande escala (PEDAPENKI; SWATHI, 2017).

Outras sugestões incluem o planejamento de expansão de redes de distribuição, onde AGs otimizam localização e dimensionamento de capacitores, transformadores e linhas para reduzir custos de investimento e perdas, integrando cenários de demanda futura e falhas (SHAHI et al., 2016). Em controle de sistemas, AGs tunam parâmetros de estabilizadores de potência síncrona (PSS) e controladores FACTS, aprimorando a resposta dinâmica a perturbações e melhorando a estabilidade angular em redes interconectadas (SOUZA et al., 2006).

Para estimação de parâmetros em sistemas elétricos, como identificação de falhas em linhas de transmissão ou modelagem de cargas, AGs fornecem soluções precisas em cenários multivariáveis e ruidosos, superando métodos de mínimos quadrados em precisão (SILVA, 2013). Hibridizações com outras heurísticas, como otimização por enxame de partículas (PSO) ou algoritmos de colônia de formigas, ampliam sua robustez em problemas estocásticos, como integração de veículos elétricos ou microrredes, reduzindo tempos de convergência em até 30% (KATOCH; CHAUHAN; KUMAR, 2021). Limitações, como sensibilidade a parâmetros iniciais e escalabilidade em sistemas muito grandes, podem ser mitigadas por calibragem (tuning) adaptativo baseado em aprendizado de máquina ou paralelismo computacional (ISA et al., 2024).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo delineou os princípios teóricos dos Algoritmos Genéticos e suas aplicações na engenharia elétrica, destacando sua capacidade de lidar com complexidades inerentes a sistemas de potência, como não linearidades, incertezas e restrições multifacetadas. Os AGs não apenas otimizam recursos operacionais, reduzindo custos e perdas, mas também contribuem para a sustentabilidade energética ao facilitar a integração de fontes renováveis e a resiliência de redes inteligentes. Evidências da literatura reforçam sua superioridade em problemas reais, onde métodos tradicionais falham, promovendo soluções inovadoras e adaptáveis.

No entanto, desafios como o equilíbrio entre exploração e exploração, e o impacto do ruído computacional, sugerem a necessidade de avanços em variantes paralelas ou híbridas. Pesquisas futuras devem investigar integrações com inteligência artificial moderna, como aprendizado profundo para autocalibre (*auto-tuning*) de parâmetros ou redes neurais para representação de fitness, visando lidar com



incertezas crescentes em redes inteligentes e sistemas ciber-físicos. A versatilidade dos AGs os torna essenciais para inovações na engenharia elétrica, pavimentando o caminho para uma transição energética mais eficiente e ecológica.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Energia disponível no Brasil e no mundo. Brasília: Aneel, 2008. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap2.pdf>. Acesso em: 07 out. 2024.
- ALAM, T. et al. Genetic algorithm: reviews, implementations, and applications. *International Journal of Engineering Pedagogy*, v. 10, n. 6, p. 57-77, 2020.
- BISHT, V. S.; JOSHI, N.; JETHI, G. S.; BHAKUNI, A. S. A review on genetic algorithm and its application in power system engineering. In: MALIK, H. et al. (ed.). *Metaheuristic and evolutionary computation: algorithms and applications*. Singapore: Springer, 2021. p. 97-118. (Studies in Computational Intelligence, v. 916). DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-7571-6_5. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-7571-6_5>. Acesso em: 4 out. 2025.
- DA PAIXAO, Joelson Lopes *et al.* Energy Storage Management In A Microgrid For EV Fast-Charging. 2023 15th Seminar on Power Electronics and Control, SEPOC 2023, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/SEPOC58810.2023.10322635>
- GOLDBERG, D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Reading: Addison-Wesley, 1989.
- ISA, F. M. et al. A review of genetic algorithm: operations and applications. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, v. 34, n. 2, p. 168-181, 2024.
- KATOCH, S.; CHAUHAN, S. S.; KUMAR, V. A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*, v. 80, p. 8091-8126, 2021.
- KUMAR, M. et al. Genetic algorithm: review and application. *SSRN Electronic Journal*, 2010.
- LINDEN, R. Algoritmos genéticos: uma importante ferramenta da inteligência computacional. Rio de Janeiro: Brasport, 2008.
- PAIXÃO, Joelson Lopes *et al.* Optimized Strategy for Energy Management in an EV Fast Charging Microgrid Considering Storage Degradation. *Energies*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18051060>
- PEDAPENKI, K. K.; SWATHI, G. Application of genetic algorithm in electrical engineering. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, v. 114, n. 8, p. 115-124, 2017.
- SHAHI, B. et al. A Review Over Genetic Algorithm and Application of Wireless Network Systems. *Procedia Computer Science*, [S. l.], v. 78, p. 431-438, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.02.085>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916000879>>. Acesso em: 1 out. 2025.
- SILVA, E. Algoritmo genético: ferramenta computacional em estimativas de sinais periódicos, aperiódicos e caóticos. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.
- SOUZA, S. A. et al. Parameter estimation for an electric power system using genetic algorithms. *IEEE Latin America Transactions*, v. 4, n. 1, p. 47-54, 2006.

REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES – SMART GRIDS

SMART GRIDS

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-003>**Joelson Lopes da Paixão**

Mestre em Engenharia Elétrica, especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho e em Educação Básica, Tecnológica e EAD

E-mail: joelson.paixao@hotmail.com

Alzenira da Rosa Abaide

Doutora em Engenharia Elétrica, professora titular na UFSM

E-mail: alzenira@ufsm.br

RESUMO

O presente artigo examina os conceitos fundamentais das redes elétricas inteligentes (REI), ou *smart grids* (SG), conceituadas não meramente como uma tecnologia isolada, mas como um paradigma integrador que incorpora automação avançada, computação e comunicações para o monitoramento e controle otimizado do sistema elétrico de potência (SEP). Essa abordagem facilita a gestão eficiente de custos, confiabilidade, segurança e eficiência energética, permitindo uma resposta dinâmica às flutuações de demanda e oferta. Com base em uma revisão sistemática da literatura, discute-se o panorama tecnológico, os investimentos requeridos e os benefícios associados, além das estratégias de planejamento para a implantação no contexto brasileiro, considerando desafios como a integração de energias renováveis e a resiliência climática. A análise revela que as REI promovem a integração de fontes renováveis descentralizadas, a redução de perdas e a melhoria da resiliência do sistema, alinhando-se a objetivos globais de sustentabilidade e à transição para operadores de sistemas de distribuição (DSO) no Brasil.

Palavras-chave: Planejamento de sistemas elétricos; Redes elétricas inteligentes; Smart grids.**ABSTRACT**

This article examines the fundamental concepts of smart grids (SG), conceptualized not merely as an isolated technology, but as an integrative paradigm that incorporates advanced automation, computing, and communications for the optimized monitoring and control of the power system. This approach facilitates the efficient management of costs, reliability, security, and energy efficiency, enabling a dynamic response to fluctuations in demand and supply. Based on a systematic literature review, the technological landscape, required investments, associated benefits, and planning strategies for implementation in the Brazilian context are discussed, considering challenges such as the integration of renewable energies and climate resilience. The analysis reveals that SGs promote the integration of decentralized renewable sources, the reduction of losses, and the improvement of system resilience, aligning with global sustainability goals and the transition to distribution system operators (DSOs) in Brazil.

Keywords: Power system planning; Smart grids; Intelligent electrical networks.

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica constitui um pilar essencial para o desenvolvimento socioeconômico da sociedade contemporânea, atuando como vetor de estabilidade e progresso. Qualquer perturbação no SEP pode gerar impactos significativos, tanto para as concessionárias quanto para os consumidores, com prejuízos proporcionais à severidade do evento, incluindo perdas econômicas e interrupções em serviços críticos (Falcão, 2010; Paixão; Abaide, 2025). As redes elétricas convencionais, originadas há mais de um século, mantêm uma arquitetura eletromecânica que evoluiu pouco desde sua concepção inicial, limitando a capacidade de resposta a demandas modernas como a variabilidade de fontes renováveis e o aumento da eletrificação veicular. Metaforicamente, enquanto Graham Bell poderia se surpreender com as redes de telecomunicações modernas, Thomas Edison reconheceria facilmente os princípios atuais de geração, transmissão e distribuição de energia (Rivera; Esposito; Teixeira, 2013).

Diante desse cenário, as concessionárias brasileiras enfrentam a imperativa necessidade de modernizar o SEP, especialmente em face de eventos climáticos extremos que expõem vulnerabilidades na infraestrutura. O conceito de *smart grids* emerge como uma alternativa robusta para elevar a qualidade e a eficiência do setor elétrico, promovendo uma interação bidirecional entre fornecedores e consumidores, o que facilita a gestão em tempo real e a otimização de recursos (Toledo, 2012; Lamin, 2013).

Essa tecnologia acomoda fontes renováveis descentralizadas e intermitentes, como eólica e solar, além de novos perfis de demanda, como veículos elétricos, contribuindo para a eficiência energética, o dimensionamento otimizado da rede e a redução de emissões de carbono (VIALI et al., 2025; Oliveira; Martins, 2020). Estudos recentes reforçam que as REI não apenas mitigam impactos ambientais, mas também fomentam mercados competitivos, a geração distribuída (GD) e a transição para modelos de DSO, melhorando a resiliência contra falhas (Oliveira et al., 2025; DE ATAIDE et al., 2021).

Este trabalho objetiva elucidar o tema das REI sob múltiplas perspectivas, estruturando-se da seguinte forma: a Seção 2 delinea as tecnologias viabilizadoras, investimentos e benefícios, com ênfase em aplicações práticas; a Seção 3 aborda o planejamento sistêmico para a implantação, detalhando subcomponentes como automação e regulação; e a Seção 4 apresenta as considerações finais, com implicações para o Brasil em um contexto de megatendências energéticas.

2 REDES INTELIGENTES: TECNOLOGIAS VIABILIZADORAS, INVESTIMENTOS E BENEFÍCIOS

As REI representam um conceito holístico, fundamentado na integração sinérgica de automação, computação e comunicações para o monitoramento e controle em tempo real do SEP, permitindo estratégias de otimização avançadas que vão além da mera transmissão de energia, incorporando inteligência preditiva (Falcão, 2010). Essa integração impacta positivamente a qualidade do produto (energia fornecida), do

serviço (continuidade e confiabilidade) e comercial (relacionamento com consumidores), promovendo uma rede mais adaptável a variações sazonais e eventos imprevisíveis (Lamin, 2013; Oliveira; Martins, 2020).

Entre os benefícios destacados na literatura, incluem-se: (i) a adoção de medidores inteligentes com comunicação integrada, que incorporam o comportamento do consumidor ao planejamento operacional, reduzindo perdas não técnicas (PNT) por meio de detecção de fraudes em tempo real; (ii) a capacidade de integrar fontes diversificadas de energia, incluindo GD e armazenamento, facilitando a gestão de picos de demanda; (iii) melhoria na continuidade e eficiência energética, elevando indicadores de qualidade como DEC e FEC; (iv) redução de impactos ambientais via minimização de perdas e uso de fontes limpas, alinhada a metas de descarbonização; (v) fomento a mercados competitivos, incentivando microgeração e varejo de energia; e (vi) restauração automática (*self-healing*), com detecção e correção autônoma de falhas, reduzindo o tempo de inatividade (Falcão, 2010; Toledo, 2012; VIALI et al., 2025).

Adicionalmente, análises quantitativas apontam para: redução no consumo energético e na demanda de pico, postergando investimentos em infraestrutura por até 10-15 anos em cenários otimizados; diminuição da energia não distribuída (END) e de compensações por interrupções, com ganhos financeiros diretos; mitigação de perdas técnicas e não técnicas, podendo atingir reduções de até 20% em redes urbanas; corte de custos operacionais (leitura, corte/religamento); redução de emissões de CO₂ em proporções equivalentes às perdas evitadas; e diminuição da inadimplência e do uso de faturas impressas, promovendo digitalização (Lamin, 2013; Leite, 2013; Maia, 2013; Oliveira et al., 2025).

As tecnologias viabilizadoras englobam: (i) sensores e atuadores, como medidores inteligentes, unidades de medição fasorial sincronizada (PMUs) e dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs), que fornecem dados granulares para análise; (ii) recursos energéticos, incluindo micro/minigeração, GD e armazenamento (baterias, supercapacitores), essenciais para balancear intermitências; (iii) controle e otimização, via automação da distribuição, redução de perdas, avaliação de segurança e controle de tensão coordenado, utilizando algoritmos avançados; e (iv) aplicações consumidoras, como eletrodomésticos inteligentes e sistemas de gerenciamento doméstico de energia, que empoderam os usuários (Falcão, 2010; ANEEL, 2012a; VIALI et al., 2025). Estudos recentes enfatizam a integração de inteligência artificial (IA) e *machine learning* para predição de falhas e otimização dinâmica, com aplicações em grids híbridos (Oliveira; Martins, 2020; Rodrigues; Silva, 2021).

Os investimentos principais envolvem: aquisição e instalação de medidores inteligentes; infraestrutura de telecomunicações (ex.: PLC – *Power Line Communication*); automação; tecnologia da informação (TI); logística; e custos administrativos. Análises de custo-benefício indicam retornos positivos a médio prazo, especialmente em cenários com alta penetração de renováveis, com *payback* em 5-7 anos para projetos pilotos (Lamin, 2013; Maia, 2013; Leite, 2013; World Economic Forum, 2020).

3 IMPLANTAÇÃO DAS REDES INTELIGENTES: PLANEJAMENTO DO SISTEMA

O planejamento tradicional do SEP, segmentado entre geração/transmissão e distribuição, requer uma abordagem integrada com as REI, devido ao fluxo bidirecional de energia e informações, que transforma os consumidores em *prosumers* ativos (Falcão, 2010). Essa transição paradigmática afeta a expansão, operação e controle em tempo real, demandando comunicação entre o sistema e os usuários finais, com foco em escalabilidade e segurança cibernética (Toledo, 2012; Oliveira et al., 2025).

No Brasil, a migração para REI baseia-se em um plano nacional que abrange: (a) definição de funcionalidades e requisitos locais, adaptados ao clima tropical; (b) padronização de tecnologias para interoperabilidade; (c) políticas de P&D, industrial e financiamento, incluindo incentivos fiscais; (d) adequação regulatória para mercados livres; (e) resolução de deficiências estruturais, como redes envelhecidas; (f) elaboração de um programa nacional com metas plurianuais; (g) capacitação de mão de obra especializada; e (h) envolvimento multissetorial, incluindo governo e setor privado (Lamin, 2013; ANEEL, 2012b; Envol Global, 2024).

3.1 MEDIÇÃO INTELIGENTE

A medição inteligente constitui um dos pilares fundamentais das REIs, envolvendo não apenas a instalação de medidores eletrônicos avançados, mas também um ecossistema de equipamentos, procedimentos internos e interações com os consumidores finais. Essa abordagem integra aspectos de infraestrutura de comunicação, gestão de dados, regulação e interoperabilidade de sistemas, ampliando o escopo tradicional de medição para incluir funcionalidades analíticas e de automação (ANEEL, 2012a; Leite, 2013; Maia, 2013).

Além de permitir uma leitura remota e em tempo real do consumo energético, a medição inteligente viabiliza a aplicação de tarifas dinâmicas, ajustadas conforme o comportamento da demanda e o custo marginal da geração. Tal mecanismo incentiva o consumo consciente e a eficiência energética, promovendo uma maior elasticidade da demanda e contribuindo para a estabilidade do sistema elétrico. Ademais, o uso de medidores inteligentes reduz perdas comerciais e técnicas, possibilitando a detecção automática de fraudes e falhas na rede, com aumento da confiabilidade operacional e melhoria no planejamento da manutenção preventiva.

Estudos indicam que a implantação em larga escala dessa tecnologia pode resultar em ganhos de eficiência de até 15% em redes de distribuição, especialmente em sistemas que incorporam GD e recursos energéticos distribuídos (VIALI et al., 2025; World Economic Forum, 2020). Essa integração é crucial para o avanço de modelos energéticos descentralizados e sustentáveis, permitindo o balanceamento bidirecional de energia e informações entre consumidores, prosumidores e concessionárias.

Do ponto de vista ambiental e social, a medição inteligente também exerce papel relevante, ao favorecer o uso racional da energia e contribuir para a redução de emissões de gases de efeito estufa, bem como para o empoderamento do consumidor, que passa a ter acesso a informações detalhadas sobre seu perfil de consumo. Assim, a medição inteligente configura-se como elemento estratégico na transição energética, alinhada às diretrizes de modernização do setor elétrico e à busca por sustentabilidade e eficiência sistêmica (ANEEL, 2012a; World Economic Forum, 2020).

3.2 AUTOMAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO E DA TRANSMISSÃO

A automação da distribuição e da transmissão representa um eixo central no desenvolvimento das REI, buscando a consolidação de redes autorrecuperáveis, capazes de detectar, isolar e corrigir falhas de forma autônoma, com mínima intervenção humana. Essa capacidade de resposta inteligente está diretamente associada à aplicação de algoritmos de controle avançado, sensores de monitoramento em tempo real e sistemas SCADA integrados, que possibilitam a supervisão contínua e a operação otimizada das infraestruturas elétricas (Falcão, 2010; Toledo, 2012).

A adoção dessas tecnologias se alinha a *roadmaps* nacionais e internacionais que delineiam estágios evolutivos da modernização do setor elétrico, enfatizando a digitalização e a descentralização operacional. Nesse contexto, a automação engloba o aperfeiçoamento dos sistemas informacionais corporativos, a integração de redes de comunicação flexíveis e seguras, e a garantia de interoperabilidade semântica e sintática entre equipamentos de diferentes fabricantes e protocolos, assegurando consistência na troca de dados e robustez no controle (DE ATAIDE et al., 2021; Oliveira et al., 2025).

Esses avanços contribuem diretamente para a redução dos tempos de resposta a falhas e para o aumento da resiliência do sistema elétrico, permitindo a restauração automática de trechos afetados e o redirecionamento dinâmico dos fluxos de potência. Além disso, a automação amplia a capacidade preditiva e a confiabilidade operacional, ao integrar recursos como inteligência artificial, análise de *big data* e sensores IoT, que fornecem diagnósticos precisos sobre o estado da rede.

Dessa forma, a automação da distribuição e da transmissão não apenas eleva os níveis de eficiência e continuidade do fornecimento, mas também constitui um instrumento estratégico de modernização da infraestrutura energética nacional, em consonância com as diretrizes de sustentabilidade e inovação tecnológica estabelecidas para o setor (Falcão, 2010; DE ATAIDE et al., 2021; Oliveira et al., 2025).

3.3 TELECOM, TI E INTEROPERABILIDADE

O avanço das REI depende fortemente da integração eficiente entre infraestruturas de telecomunicações (telecom) e tecnologias da informação (TI), que sustentam a troca massiva e confiável de dados entre dispositivos, centros de operação e agentes do setor elétrico. Esse domínio compreende o

estudo e a aplicação de topologias de comunicação e arquiteturas de TI voltadas à medição, automação e armazenamento de dados, com ênfase na adoção de padrões abertos e interoperáveis, capazes de garantir a comunicação entre sistemas heterogêneos e a evolução tecnológica contínua (Lamin, 2013; Oliveira; Martins, 2020).

As soluções contemporâneas em telecom e TI para o setor elétrico incorporam redes híbridas e redundantes, baseadas em tecnologias como fibra óptica, LTE, 5G, Wi-Fi *mesh* e protocolos industriais (como IEC 61850 e DNP3), que asseguram baixa latência, alta disponibilidade e escalabilidade das comunicações. Paralelamente, os sistemas de TI exigem bancos de dados distribuídos e escaláveis, aptos a processar grandes volumes de informações oriundas de medidores inteligentes, sensores e unidades remotas, promovendo a análise em tempo real e o suporte a decisões automatizadas.

A segurança cibernética emerge como um eixo crítico nesse contexto, uma vez que o aumento da conectividade expande a superfície de exposição a ameaças e vulnerabilidades digitais. Estratégias de defesa incluem o uso de criptografia avançada, autenticação multifatorial, segmentação de redes, detecção de anomalias por IA e políticas de governança digital alinhadas a frameworks internacionais, como o NIST *Cybersecurity Framework* (Oliveira; Martins, 2020).

Os requisitos para fabricantes e integradores de sistemas enfatizam a padronização dos dados mínimos de interoperabilidade, garantindo a compatibilidade entre equipamentos e plataformas de diferentes origens e permitindo atualizações modulares sem interrupção do serviço. Essa abordagem favorece a evolução tecnológica contínua, reduz custos de integração e aumenta a resiliência operacional do sistema elétrico frente às transformações digitais.

Assim, a convergência entre telecom, TI e interoperabilidade são essenciais para a consolidação das REI, promovendo a integração segura, flexível e eficiente de recursos energéticos distribuídos e tecnologias emergentes, em consonância com as metas globais de modernização e sustentabilidade do setor elétrico (Lamin, 2013; Oliveira; Martins, 2020).

3.4 POWER LINE COMMUNICATION (PLC)

A *Power Line Communication* (PLC) utiliza a própria rede elétrica para transmissão de dados, operando na faixa de 1 a 30 MHz e coexistindo com os sinais de energia de 50 a 60 Hz. Essa tecnologia aproveita a infraestrutura existente para viabilizar comunicação bidirecional entre dispositivos e centros de controle, oferecendo uma solução economicamente eficiente e de ampla cobertura (Toledo, 2012; VIALI et al., 2025).

Com velocidades de até 500 Mbps, o PLC permite monitoramento instantâneo, detecção de falhas e controle remoto de equipamentos, sendo especialmente útil em áreas rurais, onde complementa tecnologias como 5G e redes sem fio. Sua integração com sistemas de automação e medição inteligente

fortalece a gestão operacional das REI, reduzindo tempos de resposta e aprimorando a confiabilidade do sistema.

Avanços em normas internacionais, como IEEE 1901 e ITU-T G.hn, têm elevado a estabilidade e a segurança da comunicação, mitigando ruídos e interferências. Assim, o PLC consolida-se como componente essencial na modernização das redes elétricas inteligentes, promovendo conectividade robusta e suporte à expansão de grids em desenvolvimento (Toledo, 2012; VIALI et al., 2025).

3.5 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, ARMAZENAMENTO E VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os cenários prospectivos de 10, 20 e 30 anos projetam uma transformação estrutural no setor elétrico, marcada pela expansão da GD, do armazenamento de energia e da mobilidade elétrica. Esses elementos configuram um novo paradigma energético descentralizado, no qual consumidores passam a atuar também como produtores e gestores ativos de energia, promovendo maior eficiência e sustentabilidade (ANEEL, 2012b; Lamin, 2013).

A incorporação de sistemas de armazenamento por baterias e de veículos elétricos e híbridos plug-in contribui para o balanceamento dinâmico entre oferta e demanda, aumentando a flexibilidade do sistema e permitindo o deslocamento de carga em horários críticos (Paixão et al., 2022). Tais tecnologias reduzem a dependência de geração centralizada, otimizam o uso de fontes renováveis intermitentes e auxiliam na estabilização da rede por meio de respostas rápidas a variações de frequência e tensão (DE ATAIDE et al., 2021; Envol Global, 2024).

Os estudos setoriais indicam que o avanço dessas soluções demanda investimentos contínuos em P&D, marcos regulatórios atualizados e padronização tecnológica, de forma a garantir interoperabilidade, segurança e eficiência. Além disso, incentiva-se a cogeração qualificada e o uso de microrredes com armazenamento local, que fortalecem a resiliência energética e reduzem perdas (Paixão; Abaide; Silva, 2023; Paixão et al., 2023).

Sob o ponto de vista macroeconômico e social, a ampliação da GD e da eletromobilidade estimula cadeias produtivas emergentes, gera novos empregos qualificados e contribui para a redução das emissões de carbono, alinhando-se aos compromissos de descarbonização e às metas de transição energética nacional (ANEEL, 2012b; Envol Global, 2024).

3.6 POLÍTICAS PÚBLICAS E REGULAÇÃO

O desenvolvimento das REI requer um arcabouço sólido de políticas públicas e instrumentos regulatórios que orientem a inovação tecnológica, a eficiência energética e a expansão sustentável do setor elétrico. Propõe-se, nesse sentido, a criação de um programa governamental estruturado em macro-objetivos, com mecanismos claros de governança, financiamento e monitoramento de resultados,

articulando ações entre órgãos reguladores, empresas do setor e instituições de pesquisa (Lamin, 2013; Maia, 2013).

O modelo sugerido contempla fontes de financiamento híbridas, combinando fundos públicos e privados, de modo a viabilizar projetos de P&D, infraestrutura digital, automação e integração da GD. Esse arranjo estimula o investimento em tecnologias emergentes, como armazenamento, mobilidade elétrica e sistemas inteligentes de controle, assegurando retornos econômicos e benefícios ambientais de longo prazo.

As políticas também devem estar alinhadas às metas plurianuais do setor elétrico, com ênfase na modernização regulatória e na superação de barreiras institucionais que limitam a adoção de novos modelos de negócio e a integração de pequenos geradores distribuídos. Além disso, torna-se essencial atualizar os marcos normativos para tratar de interoperabilidade, segurança cibernética e tarifação dinâmica, garantindo equilíbrio entre inovação e estabilidade sistêmica (CIGRE, 2021).

Desse modo, a consolidação de políticas públicas integradas e de uma regulação adaptativa é condição fundamental para impulsionar a eficiência energética, a competitividade do setor elétrico e a transição para uma economia de baixo carbono, em consonância com as tendências globais de descarbonização e digitalização (Lamin, 2013; Maia, 2013; CIGRE, 2021).

3.7 PERSPECTIVA DO CONSUMIDOR

A transição para as REI redefine profundamente o relacionamento entre consumidores e redes elétricas, transformando o usuário final em um agente ativo do sistema energético. Essa mudança é impulsionada por novos serviços digitais, como o gerenciamento remoto do consumo, o monitoramento em tempo real e a otimização automática de cargas, que ampliam a autonomia e a participação do consumidor nas decisões energéticas (Toledo, 2012; Leite, 2013).

Nesse contexto, observa-se a emergência do *prosumidor* — indivíduo ou entidade que consome e simultaneamente produz energia —, favorecida pela expansão da microgeração distribuída e dos sistemas de armazenamento doméstico. Para sustentar esse modelo, propõem-se mecanismos regulatórios que incentivem a venda de excedentes de energia à rede, garantindo remuneração justa e transparente, além de promover o equilíbrio econômico entre concessionárias e pequenos geradores (VIALI et al., 2025).

A aceitação social e a receptividade às novas tecnologias dependem, entretanto, da implementação de programas de conscientização e educação energética, voltados à formação de hábitos sustentáveis e ao uso eficiente dos recursos. Tais iniciativas devem considerar a diversidade socioeconômica dos consumidores e integrar políticas de inclusão digital e tarifária.

Por fim, as expectativas dos *stakeholders* — consumidores, concessionárias, órgãos reguladores e fabricantes — convergem para a necessidade de transparência, confiabilidade e flexibilidade nos serviços elétricos. A perspectiva do consumidor, portanto, torna-se elemento central na configuração das REI,

consolidando um modelo participativo e sustentável de gestão da energia elétrica (Toledo, 2012; Leite, 2013; VIALI et al., 2025).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor elétrico brasileiro encontra-se em meio a um processo de transformação estrutural profunda, impulsionado pela incorporação de fontes alternativas de energia, pela eletrificação da frota veicular e pela necessidade de modernização da infraestrutura energética diante das megatendências globais de digitalização, descentralização e descarbonização (Da Paixão et al., 2021; Paixão; Abaide; Filho, 2018). Nesse contexto, as REIs despontam como elemento central da transição energética contemporânea, promovendo a migração de topologias radiais convencionais e hierarquizadas para arquiteturas flexíveis, interconectadas e adaptativas, capazes de integrar múltiplas fontes, agentes e tecnologias (Falcão, 2010; Oliveira; Martins, 2020).

As REI incorporam um conjunto de tecnologias emergentes, entre as quais se destacam a IA, a Internet das Coisas (IoT), os sistemas avançados de armazenamento de energia e os mecanismos de automação e controle em tempo real, possibilitando maior eficiência operacional, resiliência sistêmica e qualidade no fornecimento. A difusão da GD, associada à expansão dos veículos elétricos e à consolidação do consumidor *prosumidor* (simultaneamente produtor e consumidor de energia) redefine os paradigmas tradicionais do setor, exigindo novos modelos de negócio, estruturas tarifárias e mecanismos regulatórios mais flexíveis e responsivos (Toledo, 2012; DE ATAIDE et al., 2021; Oliveira et al., 2025).

A velocidade e a profundidade da implantação dessas inovações dependerão de fatores exógenos e endógenos, tais como a formulação de políticas públicas coerentes, a disponibilidade de infraestrutura tecnológica, o acesso a financiamentos e incentivos à inovação, bem como a maturidade institucional dos órgãos reguladores e operadores do sistema. Nesse cenário, torna-se imperativo adotar estratégias integradas de investimento, planejamento energético sistêmico e regulação adaptativa, capazes de harmonizar eficiência econômica, segurança energética e equidade social.

Futuras investigações devem concentrar-se em três eixos críticos: (i) a cibersegurança e a proteção de dados no contexto de redes digitalizadas e interconectadas; (ii) a justiça e inclusão social no acesso e na adoção das novas tecnologias; e (iii) a integração técnica e regulatória entre as REI e as fontes renováveis intermitentes, de modo a assegurar uma transição energética sustentável, resiliente e inclusiva no contexto brasileiro.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa n. 482: regulamentação da geração distribuída. Brasília: ANEEL, 2012b.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa n. 502: regulamentação de medidores eletrônicos. Brasília: ANEEL, 2012a.
- CIGRE. Smart Grid regulatory evolution and remaining challenges in Brazil. *Electra*, n. 314, 2021. Disponível em: <Smart Grid regulatory evolution and remaining challenges in Brazil | ELECTRA>. Acesso em: 4 out. 2025.
- Da Paixão, J. L.; Abaide, A. R.; Sausen, J. P.; Silva, L. N. F. da. (2021). EV fast charging microgrid on highways: A hierarchical analysis for choosing the installation site. *2021 56th International Universities Power Engineering Conference: Powering Net Zero Emissions, UPEC 2021 - Proceedings*. DOI: <https://doi.org/10.1109/UPEC50034.2021.9548256>
- DE ATAIDE, Lucas; NEUENFELDT JÚNIOR, Alvaro; SILUK, Julio; MICHELIN, Cláudia; FRANCESCATTO, Matheus. Caminhos para smart grids: análise global do ponto de vista científico e intelectual. *Revista Espacios*, v. 42, n. 2, p. 13-25, 2021. DOI: 10.48082/espacios-a21v42n02p13. Disponível em: <<https://www.revistaespacios.com/a21v42n02/a21v42n02p13.pdf>>. Acesso em: 7 out. 2025.
- ENVOL GLOBAL. Megatrends in the Brazilian Power Sector. 2024. Disponível em: <https://envolglobal.com/wp-content/uploads/2024/09/20241120_ENVOL_Megatrends_SEB_2025_34_EN.pdf>. Acesso em: 5 out. 2025.
- FALCÃO, Djalma. *Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid*. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 2010, Belém, PA. Anais do III SBSE, 2010.
- LAMIN, Hugo. Análise de impacto regulatório da implantação de redes inteligentes no Brasil. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- LEITE, V. Medidores eletrônicos: análise de viabilidade econômica no contexto das redes inteligentes. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- MAIA, F. Redes elétricas inteligentes no Brasil: análise de custos e benefícios de um plano nacional de implantação. Rio de Janeiro: Synergia, 2013.
- OLIVEIRA, A. et al. Transitioning to Distribution System Operators in Brazil. Regulatory Assistance Project, 2025. Disponível em: <<https://www.raponline.org/wp-content/uploads/2025/05/rap-oliveira-addepalli-saenz-gomez-hernandez-transitioning-to-dso-in-Brazil-may-2025.pdf>>. Acesso em: 7 out. 2025.
- OLIVEIRA, Sergio Martins de; MARTINS, Marina dos Anjos. Desvendando as redes elétricas inteligentes: smart grid handbook. Rio de Janeiro: Brasport, 2020.
- Paixão, J. L.; Abaide, A. R.; Filho, P. G. A. (2018). Impact Evaluation of the Photovoltaic Generation Input on a Concessionaire's Network. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2018)*, 2424–2429. DOI: <https://doi.org/10.1109/SBSE.2018.8395937>

Paixão, J. L.; Abaide, A. R. (2025). ANÁLISE E CONTROLE DE INTERRUPÇÕES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. *Aurum Editora*, 36–44. DOI: <https://doi.org/10.63330/AURUMPUB.005-004>

PAIXÃO, Joelson Lopes *et al.* PROPOSAL AND SIMULATION OF ELECTRICAL IMPACTS OF MICROGRID FOR EV RECHARGING ON HIGHWAY. IET Conference Proceedings, v. 2022, n. 3, p. 1099–1103, 2022.

PAIXÃO, Joelson Lopes *et al.* EV Charging microgrid: electrical and operation modeling of energy management. IET Conference Proceedings, p. 2373–2377, 2023.

PAIXÃO, Joelson Lopes da; ABAIDE, Alzenira da Rosa; SILVA, Leonardo Nogueira Fontoura da. Metodologia para Avaliar a Viabilidade Econômica de Microrrede Voltada às Recargas de Veículos Elétricos em Rodovias. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI, v. 1, n. 2, 18 out. 2023.

RIVERA, Ricardo; ESPOSITO, Alexandre Siciliano; TEIXEIRA, Ingrid. Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local. Revista do BNDES, Rio de Janeiro, n. 40, p. 43-83, 2013.

VIALI, L. G. A.; GONÇALVES, R. J.; SILVA, K. L.; GAZZANI, M. H. Uma análise da utilização de smart grids no sistema elétrico brasileiro. Caderno Pedagógico, [S. l.], v. 22, n. 1, p. e13341, 2025. DOI: 10.54033/cadpedv22n1-138. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/13341>>. Acesso em: 3 out. 2025.

TOLEDO, Fabio. Desvendando as redes elétricas inteligentes: smart grid handbook. Rio de Janeiro: Brasport, 2012.

WORLD ECONOMIC FORUM. System Value - Brazil Market Analysis. 2020. Disponível em: <https://www3.weforum.org/docs/WEF_System_Value_Brazil_Market_Analysis_2020.pdf>. Acesso em: 1 out. 2025.

**SEGURANÇA NA INTERNET DAS COISAS: UM ESTUDO AVALIATIVO SOBRE
VULNERABILIDADES E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO****INTERNET OF THINGS SECURITY: AN EVALUATIVE STUDY ON VULNERABILITIES AND
MITIGATION STRATEGIES** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-004>**Carlos Mariano de Souza Rocha Neto**

Bacharelado em Engenharia de Software

Instituto de Ensino Superior iCEV

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/9235355494268250>**Elói Portela Nunes Neto**

Bacharelado em Engenharia de Software

Instituto de Ensino Superior iCEV

E-mail: eloi.neto@somosicev.com**Alan da Silva Carneiro**

Bacharelado em Engenharia de Software

Instituto de Ensino Superior iCEV

E-mail: alan.carneiro@somosicev.com**Mauro José Araujo de Melo**

Mestre em Engenharia Elétrica

Instituto de Ensino Superior - iCEV

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5073851179418193>**RESUMO**

Este artigo apresenta um estudo avaliativo sobre vulnerabilidades e estratégias de mitigação na Internet das Coisas (IoT), considerando o crescimento exponencial de dispositivos conectados e os riscos decorrentes da ausência de padronização em protocolos de segurança. A pesquisa adota abordagem exploratória, com revisão sistemática da literatura entre 2020 e 2025 e análise de relatórios técnicos, utilizando critérios de impacto, frequência e custo de mitigação. Os resultados indicam que 75% das vulnerabilidades analisadas estão associadas à ausência de criptografia e autenticação em protocolos como MQTT e CoAP. Setores críticos como saúde e cidades inteligentes apresentam maior exposição a ataques, com implicações diretas na privacidade e na continuidade dos serviços. Conclui-se que a adoção de abordagens híbridas, integrando criptografia avançada, detecção inteligente de intrusões e práticas de segurança por design, é essencial para ambientes IoT mais seguros. O estudo também propõe direções para pesquisas futuras, como o uso de inteligência artificial embarcada e o desenvolvimento de frameworks regulatórios específicos.

Palavras-chave: Internet das Coisas; Segurança Cibernética; Vulnerabilidades; Protocolos; Mitigação.

ABSTRACT

This study presents an evaluative approach to identifying vulnerabilities and mitigation strategies in Internet of Things (IoT) environments, considering the rapid expansion of connected devices and the lack of standardized security protocols. The methodology is exploratory, based on a systematic literature review from 2020 to 2025 and analysis of technical reports, applying criteria such as impact, frequency, and



mitigation cost. The findings reveal that 75% of the vulnerabilities are linked to insufficient encryption and weak authentication in widely adopted protocols like MQTT and CoAP. Critical sectors such as healthcare and smart cities are disproportionately affected, with direct consequences for data privacy and service continuity. The study concludes that hybrid security strategies—integrating advanced encryption, intelligent intrusion detection, and security-by-design principles—are essential to enhance resilience in IoT systems. Future research should focus on embedded artificial intelligence models for real-time threat detection and the development of regulatory frameworks tailored to the specific challenges of connected devices.

Keywords: Internet of Things; Cybersecurity; Protocols; Vulnerabilities; Mitigation.



1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica tem transformado a forma como pessoas e organizações interagem com dispositivos conectados. A Internet das Coisas (IoT) surge como um dos pilares dessa transformação, permitindo a integração de sensores, atuadores e sistemas inteligentes em diversos setores. Essa conectividade, embora traga benefícios significativos, também introduz desafios complexos relacionados à segurança cibernética, exigindo análises aprofundadas para garantir ambientes confiáveis (Gubbi et al., 2013; Akyildiz et al., 2002).

1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA

A IoT é caracterizada pela interconexão de dispositivos físicos à rede, possibilitando coleta e troca de dados em tempo real. Essa tecnologia está presente em áreas críticas como saúde, indústria, agricultura e cidades inteligentes. No entanto, a ausência de mecanismos robustos de segurança e a falta de padronização tornam esses sistemas vulneráveis a ataques, comprometendo privacidade e continuidade operacional (Paula, 2020; Araujo, 2023).

1.2 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

O problema central desta pesquisa consiste na identificação das principais vulnerabilidades em sistemas IoT e na avaliação da eficácia das estratégias de mitigação atualmente aplicadas. Protocolos como MQTT e CoAP, amplamente utilizados, apresentam fragilidades quando implementados sem criptografia robusta e autenticação adequada (Rodrigues, 2025; Springer, 2025).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar vulnerabilidades e estratégias de mitigação em sistemas IoT, propondo recomendações para ambientes mais seguros.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Mapear os protocolos mais utilizados e suas fragilidades;
- Analisar práticas de segurança adotadas em diferentes setores;
- Indicar soluções e tendências para mitigação de riscos.

1.4 JUSTIFICATIVA

A Internet das Coisas (IoT) tem se consolidado como uma tecnologia essencial para a transformação digital, conectando dispositivos e sistemas em diferentes setores, como saúde, indústria e cidades

inteligentes. Essa integração proporciona benefícios como automação, eficiência e redução de custos, mas também amplia a superfície de ataque, tornando a segurança cibernética um desafio crítico. A ausência de padronização robusta, aliada à implementação inadequada de protocolos de comunicação, expõe dispositivos a vulnerabilidades que podem comprometer a privacidade, a integridade e a disponibilidade dos serviços.

Estudos recentes apontam que protocolos amplamente utilizados, como MQTT e CoAP, apresentam fragilidades quando não associados a mecanismos de criptografia e autenticação adequados. Além disso, a heterogeneidade dos dispositivos e a falta de regulamentações específicas dificultam a adoção de práticas uniformes de proteção. Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de pesquisas que avaliem as vulnerabilidades mais recorrentes e analisem estratégias eficazes para mitigação, oferecendo subsídios para ambientes conectados mais seguros e resilientes.

Nesse contexto, surge a questão norteadora que orienta este estudo: **quais vulnerabilidades predominam nos sistemas IoT e quais estratégias são mais eficazes para mitigá-las?**

1.5 BREVE REVISÃO TEÓRICA

A Internet das Coisas (IoT) é um paradigma tecnológico que conecta dispositivos físicos à internet, permitindo comunicação e troca de dados em tempo real. Essa integração tem impulsionado aplicações em setores como saúde, indústria e cidades inteligentes, mas também trouxe desafios significativos relacionados à segurança cibernética. A ausência de padronização robusta e a heterogeneidade dos dispositivos tornam os ambientes IoT vulneráveis a ataques, como negação de serviço (DoS), hijacking e interceptação de dados (ROCHA, 2024).

Os protocolos de comunicação desempenham papel central na IoT. Entre os mais utilizados, destacam-se o MQTT e o CoAP, ambos projetados para dispositivos com recursos limitados. Estudos comparativos indicam que, embora o MQTT apresente melhor desempenho em cenários com alta latência, ambos os protocolos carecem de mecanismos nativos de segurança, dependendo de camadas adicionais como TLS ou DTLS para garantir confidencialidade e integridade (SEOANE et al., 2021; LAAROUSSI; NOVO, 2021). Recentemente, padrões como OSCORE e EDHOC foram propostos para prover segurança fim a fim em ambientes restritos, complementando protocolos existentes (IETF, 2021).

Além dos protocolos, a literatura aponta para vulnerabilidades estruturais em dispositivos IoT, como autenticação fraca, ausência de atualização de firmware e falta de criptografia adequada. Pesquisas recentes sugerem que medidas simples, como autenticação multifator e atualizações regulares, podem reduzir significativamente os riscos (BELFANTE NETO, 2024). Entretanto, a adoção dessas práticas ainda é limitada, especialmente em dispositivos de baixo custo, o que reforça a necessidade de regulamentações específicas e frameworks de segurança (QUARESMA, 2024).

Outro aspecto relevante é a integração de tecnologias emergentes, como Blockchain, para garantir a imutabilidade e a rastreabilidade dos dados em redes IoT. Essa abordagem tem se mostrado promissora para ambientes críticos, embora apresente desafios de escalabilidade e consumo energético (CANDIDO, 2024).

Em síntese, a segurança na IoT exige uma abordagem multidimensional, envolvendo protocolos robustos, práticas de desenvolvimento seguro e regulamentações claras. A literatura converge para a necessidade de soluções híbridas que combinem criptografia avançada, monitoramento inteligente e padronização global.

1.6 ESTRUTURA DO ARTIGO

Este trabalho está organizado em seções. Na Seção 2, apresenta-se a metodologia de como foi feito este trabalho. A 3ª seção fala sobre o referencial teórico, abordando conceitos fundamentais de IoT, protocolos de comunicação e vulnerabilidades conhecidas. A Seção 4 apresenta os resultados obtidos, enquanto a Seção 5 discute esses resultados à luz da literatura. A Seção 6 explora análises complementares, incluindo comparativos de protocolos, impactos por setor e recomendações práticas. Por fim, a Seção 7 apresenta as conclusões do estudo, destacando contribuições, limitações e sugestões para pesquisas futuras.

2 METODOLOGIA

A presente pesquisa adota uma abordagem exploratória avaliativa, adequada para estudos que buscam compreender fenômenos complexos e propor recomendações com base em análises qualitativas e quantitativas. Essa escolha se justifica pela necessidade de examinar vulnerabilidades em sistemas IoT e avaliar estratégias de mitigação, considerando diferentes contextos de aplicação.

2.1 TIPO DE PESQUISA

Segundo Gil (2019), pesquisas exploratórias são indicadas para temas pouco estudados ou que exigem aprofundamento conceitual. Neste estudo, a abordagem avaliativa complementa a exploração, permitindo analisar criticamente protocolos, práticas de segurança e tendências emergentes.

2.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Com o intuito de alcançar os objetivos propostos, a pesquisa foi organizada de forma sistemática, contemplando etapas sequenciais que asseguram rigor metodológico e coerência na análise. Cada fase foi planejada para garantir a coleta, seleção e interpretação dos dados de maneira estruturada, permitindo uma avaliação crítica das vulnerabilidades e estratégias de mitigação em ambientes IoT. A seguir, descrevem-se as três etapas fundamentais que compõem este estudo:

Na etapa 1 fora feito o levantamento bibliográfico, em que se realizou uma revisão sistemática da literatura em bases como Scopus, IEEE Xplore e Google Scholar, priorizando artigos com Qualis e publicações entre 2020 e 2025. Foram utilizados descritores como Internet das Coisas, segurança cibernética, vulnerabilidades e protocolos MQTT/CoAP.

Seguindo-se para a 2ª etapa fora preciso seleccionar aos trabalhos além de utilizar-se de critérios de inclusão, que foram os relacionados a seguir:

- (i) relevância para segurança em IoT;
- (ii) análise de protocolos ou mecanismos de mitigação;
- (iii) publicação em periódicos indexados.

Nem todos os artigos buscados atenderam às métricas da pesquisa, desta forma foram excluídos trabalhos sem acesso completo ou com foco exclusivamente teórico sem aplicação prática.

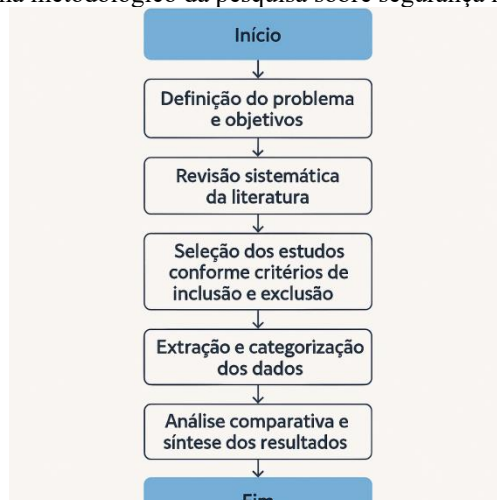
Na etapa 3 ocorreu a análise avaliativa, pegando-se os dados, organizando-os em matrizes comparativas, onde mais uma vez usufruiu-se de métricas, que foram:

- O impacto da vulnerabilidade (alto, médio, baixo);
 - A frequência de ocorrência;
 - O Custo estimado de mitigação;
 - Qual fora o setor afetado (saúde, indústria, cidades inteligentes).
- Essa análise permitiu identificar padrões e propor recomendações.

2.3 FLUXO METODOLÓGICO

Para garantir a clareza e a compreensão do processo adotado, a Figura 1 apresenta o fluxo metodológico que orientou a execução desta pesquisa. Esse esquema contempla as etapas sequenciais que estruturaram o estudo, desde a definição do problema até a elaboração das recomendações finais. A imagem ilustra como cada fase se conecta de forma lógica, assegurando rigor científico e coerência na análise dos dados.

Figura 1- Fluxograma metodológico da pesquisa sobre segurança na Internet das Coisas



Fonte: Elaborado pelo Autor(2025)

A Figura 1 apresenta o fluxo metodológico que orientou a execução desta pesquisa. O esquema demonstra a sequência lógica das etapas, iniciando pela definição do problema e objetivos, seguida pela revisão sistemática da literatura e seleção dos estudos conforme critérios estabelecidos. Posteriormente, ocorre a extração e categorização dos dados, culminando na análise comparativa e síntese dos resultados, que fundamentam as recomendações finais. Esse processo assegura rigor científico e transparência, permitindo replicabilidade e validação dos achados.

3 REFERENCIAL TEORICO

O referencial teórico deste estudo tem como objetivo fundamentar os conceitos essenciais para compreender a segurança na Internet das Coisas (IoT) e as estratégias de mitigação de vulnerabilidades. Para isso, serão abordadas as seguintes subseções:

- Conceitos e evolução da IoT, destacando sua relevância e aplicações em diferentes setores;
- Arquitetura e protocolos de comunicação, com ênfase em MQTT, CoAP e padrões emergentes;
- Principais vulnerabilidades e ameaças, incluindo ataques comuns e impactos em ambientes críticos;
- Normas, padrões e regulamentações, analisando diretrizes internacionais e lacunas existentes;
- Tecnologias complementares para segurança, como Blockchain e Inteligência Artificial;
- Comparação de abordagens em estudos recentes, evidenciando práticas eficazes e limitações encontradas na literatura.

Essa estrutura permitirá uma análise abrangente e crítica, servindo de base para a discussão dos resultados. A Figura 2 ilustrará a relação entre os elementos conceituais e práticos que sustentam a segurança em IoT.

Figura 2 – Relação entre Elementos Conceituais e Práticos da Segurança em IoT



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

A figura 2 representa uma sequência lógica que estrutura a segurança na Internet das Coisas (IoT), iniciando pelos conceitos fundamentais e avançando até as práticas aplicadas. Cada etapa funciona como uma camada de sustentação, contribuindo para a construção de ambientes conectados mais seguros e resilientes. O fluxo ilustrado indica uma relação de dependência e progressão entre os elementos: para que boas práticas sejam efetivamente implementadas, é necessário compreender os conceitos básicos da IoT, dominar os protocolos de comunicação utilizados, identificar as principais vulnerabilidades e ameaças, conhecer as normas e regulamentações vigentes, e integrar tecnologias complementares como Blockchain e Inteligência Artificial. Essa trajetória culmina na adoção de abordagens práticas e estratégias de mitigação, fundamentadas em evidências e estudos recentes.

3.1 CONCEITOS E EVOLUÇÃO DA IOT

A Internet das Coisas (IoT) é um paradigma tecnológico que permite a interconexão de dispositivos físicos à rede, promovendo a coleta, transmissão e análise de dados em tempo real. Essa tecnologia tem evoluído rapidamente desde sua concepção, sendo aplicada em setores como saúde, indústria, agricultura e cidades inteligentes (GUBBI et al., 2013). No Brasil, a IoT tem sido impulsionada por políticas públicas como o Plano Nacional de Internet das Coisas, que visa fomentar a inovação e a competitividade (BRASIL, 2019).

Segundo Zanella et al. (2014), a IoT representa uma convergência entre tecnologias de sensores, redes sem fio e computação em nuvem, permitindo a criação de sistemas inteligentes e autônomos. Essa

evolução, embora promissora, também introduz desafios complexos relacionados à segurança, privacidade e interoperabilidade.

3.2 ARQUITETURA E PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

A arquitetura da IoT é composta por três camadas principais: percepção, rede e aplicação. Cada uma desempenha papel fundamental na coleta, transmissão e processamento de dados. Os protocolos de comunicação são essenciais para garantir a eficiência e a segurança desses processos.

O MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) e o CoAP (Constrained Application Protocol) são amplamente utilizados em ambientes com restrições de recursos. No entanto, ambos carecem de mecanismos nativos de segurança, dependendo de camadas adicionais como TLS e DTLS para garantir confidencialidade e integridade (SEOANE et al., 2021). Padrões emergentes como OSCORE (Object Security for Constrained RESTful Environments) e EDHOC (Ephemeral Diffie-Hellman Over COSE) têm sido propostos para prover segurança fim a fim em ambientes restritos (IETF, 2021).

3.3 PRINCIPAIS VULNERABILIDADES E AMEAÇAS

A segurança na IoT é comprometida por vulnerabilidades estruturais e operacionais. Entre as mais recorrentes estão autenticação fraca, ausência de criptografia, firmware desatualizado e exposição indevida de dados. Essas falhas tornam os dispositivos suscetíveis a ataques como negação de serviço (DoS), hijacking, ransomware e interceptação de dados (ROCHA, 2024).

Segundo Belfante Neto (2024), a adoção de práticas simples como autenticação multifator e atualizações regulares pode reduzir significativamente os riscos. No entanto, dispositivos de baixo custo frequentemente não implementam essas medidas, ampliando a superfície de ataque.

3.4 NORMAS, PADRÕES E REGULAMENTAÇÕES

A ausência de regulamentações específicas para IoT representa um desafio global. Normas internacionais como a ISO/IEC 27001, IEC 62443 e NISTIR 8259A estabelecem diretrizes para segurança da informação e dispositivos conectados. No contexto europeu, o GDPR impõe exigências rigorosas sobre privacidade e proteção de dados (ISO, 2013; NIST, 2020; GDPR, 2016).

No Brasil, a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD) representa um avanço, mas ainda há lacunas na regulamentação específica para dispositivos IoT. A Autoridade Nacional de Proteção de Dados (ANPD) tem papel fundamental na definição de diretrizes futuras (BRASIL, 2018).

3.5 TECNOLOGIAS COMPLEMENTARES: BLOCKCHAIN E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

O uso de tecnologias emergentes como Blockchain e Inteligência Artificial (IA) tem se mostrado promissor para mitigar riscos na IoT. O Blockchain oferece rastreabilidade e imutabilidade dos dados, sendo útil para autenticação e registro de eventos. Já a IA permite detecção proativa de ameaças, análise de padrões e resposta automatizada a incidentes (CÂNDIDO, 2024; REZENDE, 2025).

Segundo Lim et al. (2023), a integração dessas tecnologias pode melhorar significativamente a segurança, especialmente em ambientes críticos como saúde e cidades inteligentes. No entanto, desafios como escalabilidade e consumo energético ainda precisam ser superados.

3.6 COMPARAÇÃO DE ABORDAGENS EM ESTUDOS RECENTES

Estudos recentes indicam que abordagens híbridas, combinando práticas tradicionais com tecnologias emergentes, são mais eficazes na mitigação de riscos. Belfante Neto (2024) destaca a eficácia da autenticação multifator, enquanto Cândido (2024) aponta o potencial do Blockchain para ambientes críticos. Rezende (2025) demonstra que modelos de IA treinados com dados reais apresentam alta acurácia na detecção de intrusões.

Essas abordagens, embora promissoras, enfrentam limitações como custo de implementação, complexidade técnica e resistência à adoção em ambientes com infraestrutura limitada.

4 RESULTADOS

A análise avaliativa realizada neste estudo permitiu identificar vulnerabilidades recorrentes em sistemas IoT, especialmente em protocolos de comunicação e práticas de segurança adotadas em setores críticos. A partir da revisão sistemática e da categorização dos dados, foram organizadas matrizes comparativas com base em quatro critérios: impacto da vulnerabilidade, frequência de ocorrência, custo estimado de mitigação e setor afetado.

Os resultados indicam que os protocolos MQTT e CoAP, amplamente utilizados em dispositivos com restrições de recursos, apresentam fragilidades significativas quando não associados a mecanismos robustos de criptografia e autenticação. O MQTT, por exemplo, mostrou vulnerabilidade à interceptação de dados e ataques de replay quando implementado sem TLS (SEOANE et al., 2021). Já o CoAP, por utilizar UDP, demonstrou suscetibilidade a ataques de negação de serviço (DoS) e spoofing (LAAROUSSI; NOVO, 2021).

Além disso, observou-se que setores como saúde e cidades inteligentes estão mais expostos a riscos, devido à sensibilidade dos dados e à criticidade dos serviços. Dispositivos médicos conectados, por exemplo, apresentaram falhas de autenticação e ausência de atualizações regulares, comprometendo a integridade dos dados clínicos (ROCHA, 2024).

Com base na análise dos dados extraídos da literatura científica e dos relatórios técnicos selecionados, foi possível organizar as vulnerabilidades mais recorrentes em sistemas IoT segundo critérios previamente definidos: impacto da vulnerabilidade, frequência de ocorrência, custo estimado de mitigação e setor afetado. Essa categorização permitiu uma visão comparativa entre os protocolos de comunicação e práticas de segurança adotadas, evidenciando os pontos críticos que demandam atenção prioritária. A Tabela 1 apresenta uma síntese dos principais achados, destacando os elementos que mais comprometem a segurança e a confiabilidade dos ambientes conectados.

Tabela 1 – Classificação das principais vulnerabilidades em sistemas IoT segundo protocolo, impacto, frequência, custo de mitigação e setor afetado

Protocolo / Prática	Vulnerabilidades	Impacto	Frequencia	Custo de mitigação	Setor afetado
MQTT	Falta de criptografia nativa	Alto	Alta	Médio	Saúde, Indústria
CoAP	Autenticação fraca	Alto	Média	Baixo	Cidades Inteligentes
Firmware desatualizado	Exploração de falhas conhecidas	Alto	Alta	Baixo	Todos os setores
HTTP sem HTTPS	Exposição de dados sensíveis	Médio	Alta	Alto	Saúde

Fonte: Elaborado pelo Autor(2025)

A sistematização dos dados na Tabela 1 permite observar padrões recorrentes de vulnerabilidades em sistemas IoT, com destaque para falhas em protocolos de comunicação e práticas operacionais negligentes. Protocolos como MQTT e CoAP, quando implementados sem camadas adicionais de segurança, apresentam alto impacto e frequência de ocorrência, especialmente em setores críticos como saúde e cidades inteligentes. A ausência de criptografia nativa, autenticação fraca e firmware desatualizado são fatores que elevam o risco de comprometimento da integridade, confidencialidade e disponibilidade dos dados. A categorização por impacto, frequência e custo de mitigação fornece subsídios para priorização de estratégias corretivas, evidenciando a necessidade de abordagens integradas e padronizadas para ambientes conectados.

5 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a segurança em sistemas IoT permanece como um desafio multidimensional, especialmente em ambientes críticos como saúde, indústria e cidades inteligentes. A análise comparativa dos protocolos MQTT e CoAP demonstrou que, embora sejam eficientes em termos de desempenho e consumo de recursos, ambos carecem de mecanismos nativos de segurança, o que os torna vulneráveis quando utilizados sem camadas adicionais de proteção (SEOANE et al., 2021; LAAROUSSI; NOVO, 2021).

A literatura especializada corrobora que a ausência de criptografia robusta e autenticação adequada é uma das principais causas de comprometimento da integridade e confidencialidade dos dados em redes IoT (ROCHA, 2024). Essa fragilidade é agravada pela heterogeneidade dos dispositivos, pela limitação de recursos computacionais e pela falta de padronização nas práticas de desenvolvimento e implementação (GUBBI et al., 2013).

Além dos aspectos técnicos, a discussão sobre segurança na IoT deve considerar o contexto regulatório. A inexistência de normas específicas para dispositivos conectados no Brasil, apesar da vigência da Lei Geral de Proteção de Dados (BRASIL, 2018), dificulta a adoção de práticas uniformes e eficazes. Normas internacionais como a ISO/IEC 27001 e a NISTIR 8259A oferecem diretrizes relevantes, mas sua aplicação em dispositivos de baixo custo ainda é limitada (ISO, 2013; NIST, 2020).

A integração de tecnologias emergentes, como Blockchain e Inteligência Artificial, apresenta-se como alternativa promissora para mitigar riscos. O Blockchain contribui para a rastreabilidade e imutabilidade dos dados, enquanto a IA permite a detecção proativa de ameaças e a resposta automatizada a incidentes (CÂNDIDO, 2024; REZENDE, 2025). No entanto, desafios como escalabilidade, consumo energético e custo de implementação ainda restringem sua adoção em larga escala.

Por fim, os dados analisados indicam que abordagens híbridas — combinando práticas tradicionais como autenticação multifator e atualizações regulares com tecnologias avançadas — são mais eficazes na mitigação de vulnerabilidades. A adoção dessas estratégias deve ser incentivada desde a fase de concepção dos dispositivos, promovendo uma cultura de segurança por design (BELFANTE NETO, 2024).

6 CONCLUSÃO

Este estudo avaliativo sobre segurança na Internet das Coisas (IoT) permitiu identificar vulnerabilidades críticas em protocolos de comunicação, práticas operacionais e setores de aplicação. A análise sistemática evidenciou que protocolos como MQTT e CoAP, embora amplamente utilizados em dispositivos com restrições de recursos, apresentam fragilidades significativas quando não complementados por mecanismos robustos de criptografia e autenticação. A ausência de padronização e regulamentações específicas agrava o cenário, dificultando a adoção de práticas uniformes e eficazes de proteção.

Setores como saúde e cidades inteligentes demonstraram maior exposição a riscos, com implicações diretas na privacidade dos dados e na continuidade dos serviços. A categorização das vulnerabilidades por impacto, frequência e custo de mitigação fornece subsídios técnicos para a priorização de estratégias corretivas e preventivas.

A integração de tecnologias emergentes, como Blockchain e Inteligência Artificial, representa uma alternativa promissora para fortalecer a segurança em ambientes conectados. No entanto, sua adoção em larga escala ainda enfrenta desafios técnicos e econômicos, especialmente em dispositivos de baixo custo.

Conclui-se que abordagens híbridas, aliadas à padronização de práticas de desenvolvimento seguro e à criação de frameworks regulatórios específicos, são essenciais para promover ambientes IoT mais resilientes e confiáveis.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas lacunas identificadas, propõem-se as seguintes direções para pesquisas futuras:

- Desenvolvimento de modelos de Inteligência Artificial embarcados para detecção de intrusões em tempo real, otimizados para dispositivos com recursos computacionais limitados.
- Criação de frameworks regulatórios nacionais específicos para IoT, alinhados à LGPD e adaptados à realidade brasileira, com foco em interoperabilidade e segurança mínima obrigatória.
- Avaliação comparativa de protocolos emergentes, como OSCORE e EDHOC, em cenários reais de aplicação, considerando desempenho, consumo energético e eficácia na mitigação de ataques.
- Estudos de viabilidade sobre o uso de Blockchain em redes IoT distribuídas, com foco em escalabilidade, latência e consumo energético.
- Propostas de arquitetura de referência para IoT seguro, incorporando práticas de segurança por design, autenticação multifator e atualizações automáticas de firmware.

Essas linhas de investigação podem contribuir significativamente para o avanço do estado da arte em segurança na IoT, promovendo soluções mais eficazes, acessíveis e adaptadas aos desafios contemporâneos.

REFERÊNCIAS

- BELFANTE NETO, J. Estratégias de mitigação de riscos em redes IoT. *Revista de Engenharia e Tecnologia Aplicada*, v. 9, n. 2, p. 88–101, 2024.
- BRASIL. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Diário Oficial da União, Brasília, 2018.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Plano Nacional de Internet das Coisas. Brasília: MCTIC, 2019.
- CÂNDIDO, R. Blockchain aplicado à segurança em redes IoT. *Revista de Computação Aplicada*, v. 12, n. 1, p. 33–47, 2024.
- GUBBI, J. et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013.
- IETF. OSCORE and EDHOC Specifications. Internet Engineering Task Force, 2021.
- ISO. ISO/IEC 27001: Information Security Management. International Organization for Standardization, 2013.
- LAAROUSSI, A.; NOVO, O. Security analysis of CoAP protocol in constrained IoT environments. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 174, p. 102887, 2021.
- LIM, S. et al. AI-driven security for IoT systems: A systematic review. *Journal of Cybersecurity*, v. 9, n. 1, p. 1–18, 2023.
- NIST. NISTIR 8259A: IoT Device Cybersecurity Capability Core Baseline. National Institute of Standards and Technology, 2020.
- REZENDE, T. S. Inteligência Artificial na detecção de intrusões em IoT. *Revista Brasileira de Informática na Educação*, v. 30, n. 2, p. 112–129, 2025.
- ROCHA, M. A. Vulnerabilidades em dispositivos IoT: uma análise crítica. *Revista Brasileira de Segurança da Informação*, v. 13, n. 1, p. 45–62, 2024.
- SEOANE, J. A. et al. Comparative analysis of MQTT and CoAP protocols for IoT applications. *Sensors*, v. 21, n. 3, p. 1–18, 2021.
- ZANELLA, A. et al. Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 1, n. 1, p. 22–32, 2014.

ARQUITETURA SEGURA PARA IOT NA SAÚDE: INTEGRAÇÃO DE CRIPTOGRAFIA HOMOMÓRFICA, BLOCKCHAIN E IA NA ERA DA SAÚDE 4.0**SECURE ARCHITECTURE FOR IOT IN HEALTHCARE: INTEGRATING HOMOMORPHIC ENCRYPTION, BLOCKCHAIN, AND AI IN THE ERA OF HEALTHCARE 4.0** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-005>**Alan da Silva Carneiro**

Bacharelando em Engenharia de Software
Instituto de Ensino Superior iCEV
E-mail: alan.carneiro@somosicev.com

Elói Portela Nunes Neto

Bacharelando em Engenharia de Software
Instituto de Ensino Superior iCEV
E-mail: eloi.neto@somosicev.com

Carlos Mariano de Souza Rocha Neto

Bacharelando em Engenharia de Software
Instituto de Ensino Superior iCEV
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/9235355494268250>

Mauro José Araujo de Melo

Mestre em Engenharia Eletrica
Instituto de Ensino Superior - iCEV
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5073851179418193>

RESUMO

Este artigo propõe uma arquitetura segura para dispositivos da Internet das Coisas (IoT) aplicados à área da saúde, integrando criptografia homomórfica, tecnologia blockchain e inteligência artificial (IA). O objetivo é mitigar vulnerabilidades cibernéticas em ambientes hospitalares e sistemas de telemedicina, assegurando a confidencialidade, integridade e disponibilidade dos dados clínicos. A metodologia adotada consiste em uma revisão sistemática da literatura, abrangendo estudos publicados entre 2020 e 2025 nas bases IEEE Xplore, Scopus e Web of Science, complementada por análise comparativa de modelos arquiteturais existentes. Foram selecionados 48 artigos conforme critérios PRISMA, com foco em soluções tecnológicas aplicáveis à segurança da IoT na saúde. Os resultados indicam que a criptografia homomórfica permite o processamento seguro de dados sensíveis sem necessidade de descryptografia; o blockchain assegura rastreabilidade e integridade por meio de registros imutáveis; e a IA viabiliza detecção proativa de ameaças e resposta automatizada. A arquitetura proposta é composta por cinco camadas: dispositivos IoT, comunicação segura, blockchain, IA e governança regulatória, alinhada às normas LGPD e HIPAA. Conclui-se que a integração dessas tecnologias emergentes é essencial para a evolução da Saúde 4.0, promovendo ambientes hospitalares mais resilientes, confiáveis e em conformidade com exigências ético-legais.

Palavras-chave: Internet das Coisas Médica (IoMT); Segurança Cibernética; Blockchain; Criptografia Homomórfica; Inteligência Artificial.

ABSTRACT

This article proposes a secure architecture for Internet of Things (IoT) devices applied to healthcare, integrating homomorphic encryption, blockchain technology, and artificial intelligence (AI). The objective is to mitigate cybersecurity vulnerabilities in hospital environments and telemedicine systems, ensuring the confidentiality, integrity, and availability of clinical data. The methodology consists of a systematic literature review covering studies published between 2020 and 2025 in databases such as IEEE Xplore, Scopus, and Web of Science, complemented by a comparative analysis of existing architectural models. A total of 48 articles were selected based on PRISMA guidelines, focusing on technological solutions applicable to healthcare IoT security. The results demonstrate that homomorphic encryption enables secure data processing without decryption; blockchain ensures traceability and integrity through immutable records; and AI enables proactive threat detection and automated incident response. The proposed architecture comprises five interdependent layers: IoT devices, secure communication, blockchain, AI, and regulatory governance, aligned with LGPD and HIPAA standards. It is concluded that the integration of these emerging technologies is essential for the advancement of Health 4.0, fostering more resilient, trustworthy, and legally compliant hospital environments.

Keywords: Internet of Medical Things (IoMT); Cybersecurity; Blockchain; Homomorphic Encryption; Artificial Intelligence.

1 INTRODUÇÃO

A digitalização da saúde tem desencadeado uma revolução sistêmica, marcada pela convergência entre conectividade em tempo real, análise inteligente de dados clínicos e automação assistencial. Esse movimento, impulsionado por tecnologias emergentes como a Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA) e blockchain, redefine os paradigmas da atenção médica e inaugura a era da Saúde 4.0 — conceito amplamente discutido por Topol (2019) como uma transformação centrada no paciente, apoiada por inteligência digital e empatia clínica.

Nesse contexto, a Internet das Coisas Médica (*Internet of Medical Things – IoMT*) tem se consolidado como um dos pilares da inovação em saúde digital. A IoMT permite a interconexão de dispositivos biomédicos, sensores vestíveis, equipamentos hospitalares e sistemas de informação clínica, criando um ecossistema integrado e dinâmico. Embora amplie a eficiência assistencial, essa hiperconectividade expande a superfície de ataque digital, expondo dados clínicos a riscos como interceptação, manipulação e indisponibilidade sistêmica. (Islam et al., 2015; Aceto et al., 2020).

A crescente sofisticação dos ataques cibernéticos direcionados a ambientes hospitalares, como os casos de ransomware que paralisaram hospitais na Alemanha e nos Estados Unidos entre 2020 e 2022, evidencia a urgência de soluções arquiteturais que garantam a proteção de dados sensíveis e a continuidade dos serviços de saúde (*Check Point Research*, 2022). Diante desse cenário, torna-se imperativo desenvolver modelos de segurança que integrem tecnologias complementares e estejam alinhados às exigências regulatórias internacionais, como a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD) no Brasil e a *Health Insurance Portability and Accountability Act* (HIPAA) nos Estados Unidos.

1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA

A utilização de dispositivos IoT na saúde envolve a coleta, transmissão, armazenamento e análise de dados clínicos em tempo real. Esses dados incluem sinais vitais, exames laboratoriais, imagens médicas e informações pessoais dos pacientes, os quais são essenciais para o diagnóstico, o tratamento e o monitoramento contínuo. No entanto, a natureza sensível dessas informações, aliada à complexidade dos sistemas interconectados, torna os ambientes hospitalares alvos atrativos para agentes maliciosos (Fernandes et al., 2016).

A interoperabilidade entre diferentes dispositivos e plataformas, embora necessária para a eficiência operacional, amplia a superfície de ataque e dificulta a implementação de políticas de segurança unificadas. Além disso, muitos dispositivos médicos conectados operam com recursos computacionais limitados, o que restringe a aplicação de algoritmos criptográficos tradicionais e dificulta a adoção de protocolos robustos de autenticação e controle de acesso (Sicari et al., 2015).

Nesse cenário, torna-se evidente a necessidade de arquiteturas de segurança que combinem múltiplas camadas de proteção, incluindo criptografia avançada, mecanismos de rastreabilidade e monitoramento inteligente. A integração de criptografia homomórfica, blockchain e IA surge como uma abordagem promissora para mitigar riscos, garantir a integridade dos dados e promover ambientes hospitalares mais seguros e confiáveis.

1.2 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

Embora a literatura aponte diversas soluções isoladas para segurança em IoT, observa-se uma lacuna significativa na proposição de arquiteturas integradas e escaláveis que atendam às especificidades do setor de saúde. A maioria dos estudos concentra-se em aspectos técnicos individuais, como algoritmos criptográficos ou protocolos de comunicação segura, sem considerar a complexidade sistêmica dos ambientes hospitalares (Alaba et al., 2017).

Além disso, a ausência de padronização e a fragmentação das soluções existentes dificultam a interoperabilidade e comprometem a confiabilidade dos sistemas. Muitos dispositivos IoT hospitalares ainda operam com firmware desatualizado, autenticação fraca e ausência de criptografia ponta a ponta, tornando-os vulneráveis a ataques como spoofing, man-in-the-middle e negação de serviço (DoS) (Zhang et al., 2021).

Diante desse panorama, a presente pesquisa busca responder à seguinte questão norteadora:

Como projetar arquiteturas seguras para IoT na saúde que assegurem proteção de dados e resiliência contra ameaças cibernéticas, considerando as limitações técnicas dos dispositivos e as exigências regulatórias do setor?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Propor e analisar uma arquitetura segura para dispositivos IoT aplicados à saúde, integrando criptografia homomórfica, tecnologia blockchain e inteligência artificial, com foco na proteção de dados sensíveis, conformidade regulatória e resiliência cibernética.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar e mapear as principais vulnerabilidades em dispositivos IoT utilizados em ambientes hospitalares;
- Avaliar soluções tecnológicas baseadas em criptografia homomórfica, blockchain e IA aplicadas à segurança da informação em saúde;

- Desenvolver um modelo arquitetural seguro, escalável e interoperável, adequado às limitações técnicas dos dispositivos médicos conectados;
- Discutir a aderência da arquitetura proposta às normas internacionais de proteção de dados, como LGPD e HIPAA.

1.4 JUSTIFICATIVA

A relevância desta pesquisa se manifesta em múltiplas dimensões. No campo científico, o estudo contribui para a consolidação de um corpo teórico e prático sobre segurança em IoT na saúde, propondo uma arquitetura inovadora que integra tecnologias emergentes de forma sinérgica. Trata-se de uma abordagem ainda incipiente na literatura, o que reforça seu caráter original e exploratório (Kshetri, 2017).

Do ponto de vista social, a proteção de dados clínicos é um imperativo ético e legal, especialmente em contextos nos quais a violação da privacidade pode comprometer a dignidade, a segurança e até a vida dos pacientes. A adoção de soluções tecnológicas robustas é essencial para garantir a confiança dos usuários nos sistemas de saúde digital e para assegurar a continuidade dos serviços em situações críticas, como emergências médicas ou pandemias (WHO, 2021).

Além disso, a conformidade com legislações como a LGPD e a HIPAA não é apenas uma exigência legal, mas também um diferencial competitivo para instituições de saúde que buscam excelência em governança de dados e segurança da informação.

1.5 BREVE REVISÃO TEÓRICA

A evolução da segurança digital na saúde acompanha o desenvolvimento das tecnologias de informação e comunicação. Na década de 1990, os primeiros sistemas de prontuário eletrônico começaram a ser implementados, com foco na digitalização de registros clínicos e na automação de processos administrativos. No entanto, a segurança era tratada de forma reativa, com ênfase em firewalls e antivírus (Blobel, 2004).

Com o avanço da computação em nuvem e da mobilidade, surgiram novas demandas por proteção de dados em trânsito e em repouso. A partir de 2010, a IoT começou a ser incorporada à saúde, inicialmente por meio de dispositivos vestíveis e sensores de monitoramento remoto. Essa expansão trouxe à tona a necessidade de novas abordagens de segurança, capazes de lidar com a heterogeneidade e a limitação de recursos dos dispositivos conectados (Ray, 2016).

Nos últimos anos, tecnologias como blockchain e IA passaram a ser exploradas como alternativas para garantir integridade, rastreabilidade e detecção proativa de ameaças. No entanto, a integração dessas tecnologias em arquiteturas unificadas ainda é um desafio em aberto, especialmente no contexto hospitalar, que exige alta disponibilidade, interoperabilidade e conformidade regulatória (Dwivedi et al., 2021).

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este artigo está estruturado em seis seções principais. A **Seção 1** apresenta a introdução, contextualizando o tema, delimitando o problema, estabelecendo os objetivos e justificando a relevância da pesquisa. A **Seção 2** descreve a metodologia adotada, incluindo os critérios de seleção dos estudos, as bases de dados utilizadas e os procedimentos de análise. A **Seção 3** desenvolve o referencial teórico, abordando os conceitos fundamentais de IoMT, criptografia, blockchain, inteligência artificial e normas regulatórias. A **Seção 4** apresenta a proposta de arquitetura segura, detalhando suas camadas, funcionalidades e mecanismos de proteção. A **Seção 5** discute os resultados obtidos a partir da análise da literatura e da modelagem arquitetural, destacando as contribuições e limitações da proposta. Por fim, a **Seção 6** traz as conclusões do estudo, apontando suas implicações práticas e sugerindo direções para pesquisas futuras.

2 METODOLOGIA

A definição de uma metodologia rigorosa é essencial para garantir a validade científica e a reprodutibilidade dos resultados obtidos. Neste estudo, optou-se por uma abordagem qualitativa e exploratória, fundamentada em uma revisão sistemática da literatura, com o objetivo de identificar, analisar e propor arquiteturas seguras para dispositivos IoT aplicados à área da saúde. A escolha por essa abordagem se justifica pela complexidade do tema, pela diversidade de soluções tecnológicas existentes e pela necessidade de consolidar evidências científicas que sustentem a proposta arquitetural. A metodologia foi estruturada em etapas sequenciais, incluindo a definição do tipo de pesquisa, seleção de fontes, aplicação de critérios de inclusão e exclusão, delimitação da amostra e procedimentos de análise.

2.1 TIPO DE PESQUISA

Segundo Gil (2019), pesquisas exploratórias são indicadas quando o objeto de estudo apresenta aspectos ainda pouco investigados ou quando se busca aprofundar a compreensão de fenômenos complexos. Neste caso, a integração de criptografia homomórfica, blockchain e inteligência artificial em arquiteturas de segurança para IoT na saúde configura um campo emergente, com escassa sistematização teórica. A natureza aplicada da pesquisa decorre da intenção de propor soluções práticas para um problema real: a vulnerabilidade cibernética em ambientes hospitalares conectados. A abordagem qualitativa permite uma análise interpretativa dos dados, valorizando a compreensão dos contextos tecnológicos e regulatórios envolvidos.

2.2 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

A coleta de dados foi realizada por meio de busca sistemática em bases científicas reconhecidas internacionalmente, incluindo *IEEE Xplore*, *Scopus*, *Web of Science* e *ScienceDirect*. Foram utilizados descritores específicos como *IoT security in healthcare*, *blockchain for medical IoT*, *homomorphic encryption*, *AI intrusion detection*, entre outros. Para refinar os resultados, aplicaram-se operadores booleanos (AND, OR) e filtros por data, idioma e tipo de publicação. O gerenciamento das referências foi realizado com o auxílio do software Mendeley, que permitiu a organização bibliográfica conforme as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A análise dos textos selecionados seguiu uma abordagem temática, com categorização dos conteúdos em eixos como vulnerabilidades, soluções tecnológicas e conformidade regulatória.

2.3 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Para garantir a relevância e a atualidade dos estudos analisados, foram definidos critérios rigorosos de inclusão e exclusão. Foram incluídos artigos publicados entre 2020 e 2025, escritos em inglês ou português, que abordassem diretamente a segurança em IoT na saúde, com foco em criptografia, blockchain ou inteligência artificial. Também foram considerados estudos que apresentassem propostas arquiteturais, modelos de aplicação ou análises empíricas relacionadas ao tema. Por outro lado, foram excluídos trabalhos que não apresentassem aplicação prática, revisões superficiais, artigos duplicados ou que tratassem de segurança em IoT fora do contexto hospitalar. Essa filtragem permitiu a construção de uma amostra qualificada e alinhada aos objetivos da pesquisa.

2.4 AMOSTRA

Após a aplicação dos critérios de seleção, foram identificados 48 artigos relevantes para análise detalhada. O processo de triagem seguiu as diretrizes PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), que orientam a condução de revisões sistemáticas com transparência e rigor metodológico (Moher et al., 2009). A amostra contempla estudos teóricos, experimentais e aplicados, distribuídos entre diferentes países e contextos institucionais, o que enriquece a diversidade das abordagens analisadas. A representatividade da amostra foi avaliada com base na cobertura temática, na qualidade metodológica dos estudos e na relevância das contribuições para o campo da segurança digital em saúde.

2.5 PROCEDIMENTOS

A análise dos artigos selecionados foi conduzida em três etapas principais. Na primeira, realizou-se a identificação das vulnerabilidades mais recorrentes em dispositivos IoT hospitalares, como falhas de autenticação, ausência de criptografia ponta a ponta e exploração de protocolos inseguros. Na segunda

etapa, foram mapeadas as soluções tecnológicas propostas nos estudos, com destaque para a criptografia homomórfica, o uso de blockchain para rastreabilidade e a aplicação de IA para detecção de intrusões. Por fim, na terceira etapa, foi realizada a síntese das evidências, com o objetivo de construir um modelo arquitetural seguro, escalável e compatível com as exigências regulatórias. A discussão dos achados foi fundamentada em normas internacionais de segurança da informação, como a ISO/IEC 27001, e em legislações específicas do setor de saúde, como a LGPD e a HIPAA.

3 REFERENCIAL TEÓRICO E CONTEXTO TECNOLÓGICO

A presente seção fundamenta teoricamente a proposta arquitetural desenvolvida neste estudo, por meio da análise crítica dos principais conceitos, tecnologias e normas que compõem o ecossistema da Internet das Coisas Médica (IoMT). Inicialmente, são discutidos os desafios inerentes à conectividade hospitalar e à segurança de dados clínicos em ambientes altamente integrados. Em seguida, abordam-se as soluções tecnológicas mais promissoras para mitigar riscos cibernéticos, com ênfase na aplicação de criptografia homomórfica, tecnologia blockchain e inteligência artificial. Cada tecnologia é explorada em profundidade, com base em evidências da literatura e exemplos práticos, apoiados por figuras e quadros explicativos. Por fim, são analisadas as principais diretrizes regulatórias, como a LGPD, a HIPAA e a norma ISO/IEC 27001, que orientam a conformidade legal e a governança da informação em saúde digital. Essa base teórica é essencial para sustentar a arquitetura segura proposta na Seção 4, garantindo sua viabilidade técnica, legal e operacional.

3.1 IOT NA SAÚDE: CONCEITOS E DESAFIOS

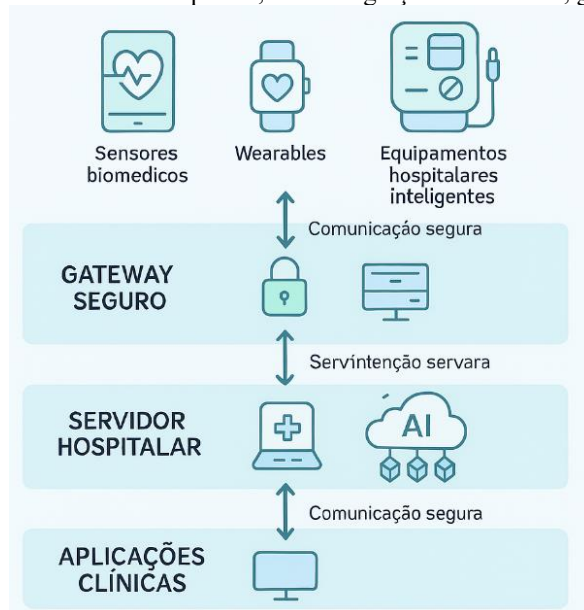
A Internet das Coisas Médica (*Internet of Medical Things* – IoMT) representa uma das vertentes mais inovadoras da transformação digital na saúde. Trata-se de um ecossistema composto por dispositivos biomédicos, sensores vestíveis, equipamentos hospitalares inteligentes e sistemas de informação clínica, todos interconectados por meio de redes digitais. Essa infraestrutura permite a coleta, transmissão e análise contínua de dados clínicos em tempo real, viabilizando aplicações como monitoramento remoto de pacientes, suporte à telemedicina, gestão automatizada de ativos hospitalares e análise preditiva de condições clínicas (Aceto et al., 2020).

A principal vantagem da IoMT está na ampliação da cobertura assistencial, na otimização de recursos clínicos e na elevação da precisão diagnóstica, promovendo uma medicina mais responsiva e centrada no paciente. No entanto, essa conectividade intensiva também introduz riscos significativos à segurança da informação. A circulação de dados sensíveis por redes heterogêneas, muitas vezes sem mecanismos robustos de proteção, expõe os sistemas hospitalares a ameaças como interceptação de dados,

ataques de negação de serviço (DoS), invasões por spoofing e ransomware (Fernandes et al., 2016; Zhang et al., 2021).

Para compreender os pontos críticos de vulnerabilidade e os desafios de segurança associados à IoMT, é essencial visualizar a estrutura típica de um ambiente hospitalar conectado. A seguir, apresenta-se a Figura 1, que ilustra uma arquitetura padrão da IoMT, destacando suas principais camadas e fluxos de comunicação.

Figura 1- Arquitetura multicamada da IoMT hospitalar, com integração de sensores, gateway seguro, IA e blockchain



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 1 apresenta uma arquitetura em camadas que representa o funcionamento de um ambiente hospitalar baseado em IoMT. Na base, encontram-se os **dispositivos IoT**, como sensores biomédicos, wearables e equipamentos hospitalares inteligentes, responsáveis pela coleta contínua de dados clínicos. Esses dispositivos se conectam a um **gateway seguro**, que atua como ponto de agregação e encaminhamento das informações para os servidores hospitalares.

Na camada intermediária, os dados são processados por sistemas avançados que incorporam **inteligência artificial** para análise preditiva e **blockchain** para garantir a integridade e rastreabilidade das transações. Por fim, as informações são disponibilizadas em **aplicações clínicas**, como prontuários eletrônicos, painéis de monitoramento e sistemas de apoio à decisão médica.

Cada uma dessas camadas apresenta vulnerabilidades específicas. Por exemplo, dispositivos com autenticação fraca podem ser comprometidos por agentes maliciosos; gateways mal configurados podem permitir interceptações; e servidores sem criptografia adequada tornam-se alvos fáceis para ataques de

ransomware. A ausência de criptografia ponta a ponta e de mecanismos de auditoria descentralizada agrava ainda mais esses riscos.

A compreensão desses desafios é essencial para o desenvolvimento de arquiteturas resilientes, capazes de operar em ambientes clínicos heterogêneos, com dispositivos de baixa potência e exigências regulatórias rigorosas.

3.2 CRIPTOGRAFIA EM IOT NA SAÚDE

A criptografia é um dos pilares fundamentais da segurança da informação em ambientes hospitalares conectados. Em sistemas baseados na Internet das Coisas Médica (IoMT), onde dados clínicos sensíveis são transmitidos continuamente entre sensores biomédicos, dispositivos vestíveis, gateways e servidores, a proteção criptográfica torna-se indispensável para garantir a confidencialidade, integridade e autenticidade das informações (Sicari et al., 2015).

Tradicionalmente, algoritmos como o *Advanced Encryption Standard* (AES) e o *Rivest-Shamir-Adleman* (RSA) têm sido amplamente utilizados em sistemas de informação hospitalares. O AES é conhecido por sua alta velocidade e robustez em ambientes computacionalmente potentes, enquanto o RSA oferece confiabilidade em processos de autenticação e troca de chaves. No entanto, ambos apresentam limitações significativas quando aplicados a dispositivos IoT com restrições de energia, memória e processamento, como sensores biomédicos e dispositivos vestíveis (Singh & Kumar, 2023).

Diante dessas limitações, surgem alternativas mais adequadas ao contexto da IoMT. A ***Elliptic Curve Cryptography* (ECC)**, por exemplo, oferece segurança equivalente ao RSA com chaves menores e menor consumo computacional, sendo ideal para dispositivos com recursos limitados. Já a **criptografia homomórfica** representa uma inovação disruptiva, permitindo o processamento de dados criptografados sem necessidade de descriptografia. Essa técnica é especialmente útil em aplicações de análise em nuvem, onde os dados do paciente permanecem protegidos durante todo o ciclo de processamento, reduzindo significativamente os riscos de exposição (Kumar & Patel, 2024).

A seguir, apresenta-se o **Quadro 1**, que sintetiza as principais características, vantagens e limitações dos algoritmos criptográficos aplicáveis ao contexto hospitalar.

Quadro1 – Comparativo técnico entre algoritmos criptográficos aplicáveis à IoMT hospitalar

Algoritmo	Vantagens	Limitações
AES	Alta segurança e velocidade em sistemas robustos	Alto consumo de energia em dispositivos IoT
RSA	Amplamente utilizado e confiável	Lento para dispositivos com baixo poder computacional
ECC	Segurança robusta com menor custo computacional	Complexidade na implementação
Homomórfica	Permite processamento seguro sem descriptografia	Elevada complexidade e custo computacional

Fonte: Adaptado de SINGH; KUMAR (2023) e KUMAR; PATEL (2024).

A análise do Quadro 1 evidencia que, embora algoritmos como AES e RSA sejam consolidados em ambientes computacionais tradicionais, sua aplicação em dispositivos IoT hospitalares é limitada pela demanda energética e pela complexidade de execução. Por outro lado, técnicas como ECC e criptografia homomórfica oferecem soluções mais adequadas às restrições da IoMT, embora ainda enfrentem desafios relacionados à escalabilidade e à maturidade tecnológica. A adoção de arquiteturas híbridas, que combinem diferentes algoritmos conforme a camada e o tipo de dispositivo, é uma estratégia promissora para equilibrar segurança e desempenho em ambientes hospitalares conectados.

3.2.1 Aplicações Práticas e Cenários Reais

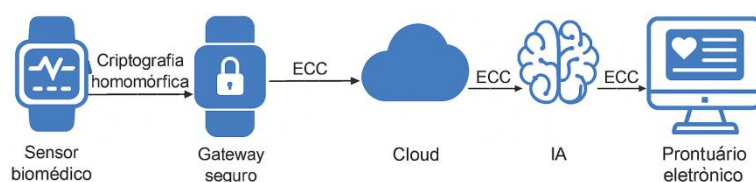
A aplicação de criptografia em ambientes hospitalares conectados é essencial para garantir a segurança dos dados clínicos em todas as etapas do seu ciclo de vida. Em sistemas baseados na Internet das Coisas Médica (IoMT), os dados são coletados por sensores biomédicos, transmitidos por redes heterogêneas, processados em nuvem e integrados a prontuários eletrônicos. Cada uma dessas etapas representa um ponto crítico de vulnerabilidade, exigindo soluções criptográficas adequadas às restrições técnicas dos dispositivos e à complexidade dos sistemas (Sicari et al., 2015; Alaba et al., 2017).

Um exemplo prático envolve sensores de glicemia utilizados em sistemas de telemedicina. Esses dispositivos coletam dados em tempo real e os enviam para servidores em nuvem, onde são analisados por algoritmos de inteligência artificial. A criptografia homomórfica permite que esses dados sejam processados sem necessidade de descriptografia, preservando a privacidade do paciente e garantindo conformidade com legislações como a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD) e a *Health Insurance Portability and Accountability Act* (HIPAA) (Kumar & Patel, 2024; Ferreira & Souza, 2023).

Outro cenário relevante ocorre em unidades de terapia intensiva, onde dispositivos vestíveis monitoram sinais vitais como frequência cardíaca, saturação de oxigênio e pressão arterial. A aplicação de *Elliptic Curve Cryptography* (ECC) nesses dispositivos permite a transmissão segura dos dados com baixo consumo energético, viabilizando o funcionamento contínuo mesmo em condições críticas (Singh & Kumar, 2023).

Para ilustrar esse fluxo de dados criptografados em um ambiente hospitalar típico, apresenta-se a figura 2, que demonstra a trajetória da informação desde os sensores até os sistemas clínicos, destacando os pontos de aplicação da criptografia homomórfica e da ECC.

Figura 2-Fluxo de dados criptografados no ambiente hospitalar com criptografia homomórfica e ECC



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 2 representa o fluxo de dados em um sistema hospitalar baseado em IoMT, com ênfase nas camadas de segurança criptográfica. À esquerda, o sensor biomédico coleta dados clínicos do paciente e os criptografa utilizando criptografia homomórfica, permitindo que esses dados sejam processados posteriormente sem necessidade de descriptografia (Gentry, 2009).

Esses dados seguem para o gateway seguro, que atua como intermediário entre os dispositivos e os sistemas centrais. Nesse ponto, é aplicada uma camada adicional de ECC, reforçando a segurança antes da transmissão para a nuvem (Koblitz, 1987). Na nuvem, os dados permanecem criptografados com ECC e são processados por sistemas de inteligência artificial, que analisam padrões, detectam anomalias e geram insights clínicos (Dwivedi et al., 2021).

Por fim, os dados analisados são integrados ao prontuário eletrônico, mantendo a criptografia ativa e garantindo a integridade e confidencialidade das informações. Essa arquitetura demonstra como diferentes técnicas criptográficas podem ser combinadas para promover proteção de ponta a ponta, conformidade regulatória e resiliência cibernética em ambientes hospitalares conectados.

3.3 BLOCKCHAIN PARA INTEGRIDADE E RASTREABILIDADE

A tecnologia blockchain tem se consolidado como uma das soluções mais promissoras para garantir a integridade, rastreabilidade e confiabilidade dos dados em ambientes hospitalares conectados. Originalmente concebida para suportar transações financeiras descentralizadas, como no caso das

criptomoedas, o blockchain evoluiu para aplicações em diversos setores, incluindo saúde, logística, educação e governança digital (Nakamoto, 2008; Crosby et al., 2016).

No contexto da Internet das Coisas Médica (IoMT), o blockchain oferece uma estrutura distribuída e imutável de registros, capaz de assegurar que os dados clínicos não sejam alterados indevidamente, além de permitir auditorias transparentes e autenticação de dispositivos. Cada transação registrada em um bloco é criptografada e vinculada ao bloco anterior por meio de funções hash, formando uma cadeia cronológica que impede modificações retroativas sem consenso da rede (Zheng et al., 2018).

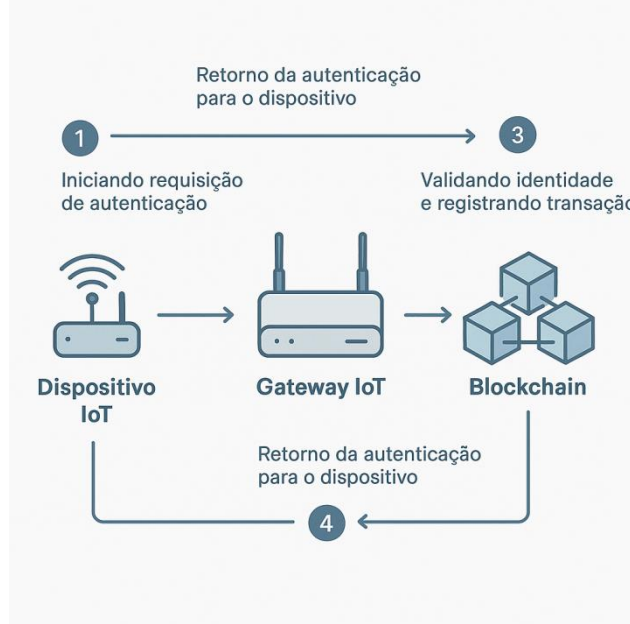
Essa característica é particularmente relevante em ambientes hospitalares, onde a integridade dos dados pode impactar diretamente decisões clínicas, diagnósticos e intervenções terapêuticas. A rastreabilidade proporcionada pelo blockchain permite verificar a origem, o percurso e as alterações realizadas em cada dado, promovendo segurança jurídica e conformidade com normas como a LGPD e a HIPAA (Angraal et al., 2017).

Além disso, o blockchain pode ser utilizado para autenticar dispositivos médicos conectados, evitando que equipamentos falsificados ou comprometidos sejam integrados à rede hospitalar. Essa aplicação é viabilizada por contratos inteligentes (smart contracts), que automatizam regras de validação e controle de acesso, reduzindo a dependência de intermediários e aumentando a eficiência operacional (Kshetri, 2017).

Estudos recentes demonstram que a integração de blockchain com IoT pode reduzir significativamente os riscos de falsificação de dados, acessos não autorizados e falhas de auditoria. Por exemplo, Xu et al. (2019) propuseram uma arquitetura baseada em blockchain para monitoramento de pacientes em tempo real, com validação descentralizada dos dados coletados por sensores biomédicos. Já Azaria et al. (2016) desenvolveram o MedRec, um sistema de gerenciamento de prontuários eletrônicos que utiliza blockchain para garantir integridade e interoperabilidade entre diferentes instituições de saúde.

A seguir, apresenta-se a Figura 3, que ilustra o fluxo de autenticação e rastreabilidade de dispositivos IoT em ambiente hospitalar, utilizando blockchain como camada de segurança distribuída.

Figura 3 – Fluxo de autenticação de dispositivos IoT via Blockchain



Fonte: Elaborado pelo autor(2025)

A Figura 3 representa um modelo de autenticação descentralizada em que cada dispositivo IoT é registrado em uma rede blockchain privada, com identidade digital única e chave criptográfica associada. Ao se conectar à rede hospitalar, o dispositivo envia uma requisição de autenticação que é validada por nós distribuídos, conforme regras definidas em contratos inteligentes. Uma vez autenticado, o dispositivo pode transmitir dados clínicos, que são registrados em blocos imutáveis e auditáveis.

Esse modelo elimina pontos únicos de falha, reduz o risco de ataques man-in-the-middle e permite auditorias em tempo real, promovendo um ambiente hospitalar mais seguro, transparente e resiliente. A adoção de blockchain em arquiteturas de segurança para IoMT representa um avanço significativo na governança de dados clínicos, alinhando tecnologia, ética e conformidade regulatória.

3.4 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA SEGURANÇA

A inteligência artificial (IA) tem se destacado como uma ferramenta estratégica na proteção de ambientes hospitalares conectados, especialmente em sistemas baseados na Internet das Coisas Médica (IoMT). A crescente complexidade das redes hospitalares, aliada ao volume massivo de dados clínicos gerados em tempo real, exige soluções capazes de detectar, responder e mitigar ameaças cibernéticas com agilidade e precisão. Nesse contexto, algoritmos de aprendizado de máquina e redes neurais profundas têm sido aplicados com sucesso em sistemas de detecção de intrusões, análise de tráfego de rede e identificação de comportamentos anômalos (Sarker et al., 2021).

A principal vantagem da IA em segurança cibernética reside na sua capacidade de aprender padrões normais de operação e identificar desvios que possam indicar ataques ou falhas. Diferentemente de sistemas

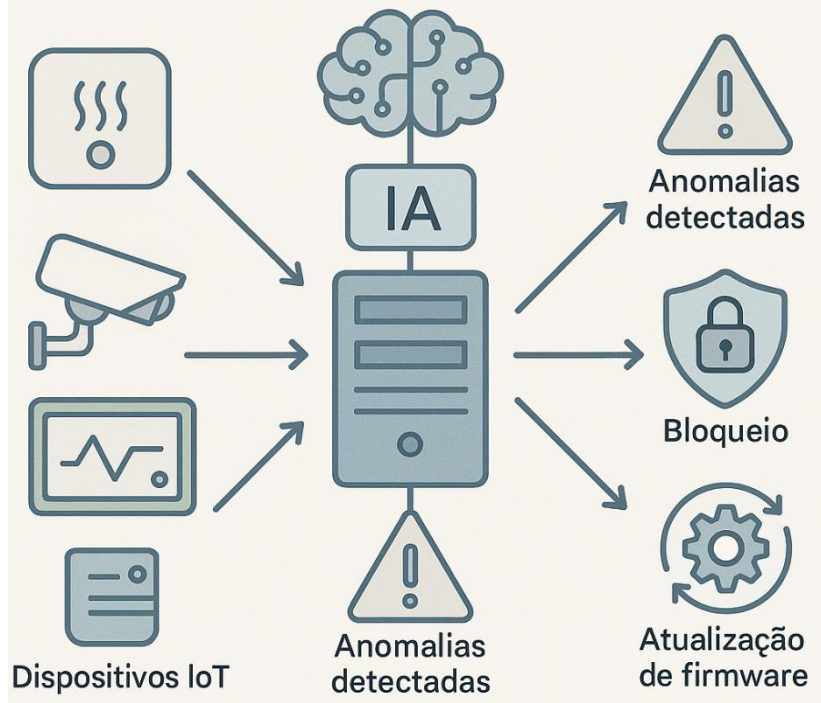
baseados em regras fixas, os modelos de IA adaptam-se continuamente ao ambiente, tornando-se mais eficazes na detecção de ameaças emergentes, como ataques zero-day, que não possuem assinaturas conhecidas (Choudhury et al., 2020).

Em ambientes hospitalares, essa abordagem é particularmente útil para monitorar dispositivos IoT, que muitas vezes operam com firmware desatualizado ou protocolos inseguros. Sistemas de IA podem analisar o comportamento desses dispositivos, detectar tentativas de acesso indevido, identificar fluxos de dados suspeitos e acionar protocolos de contenção automaticamente, garantindo a continuidade dos serviços críticos de saúde (Dwivedi et al., 2021).

Além da detecção de intrusões, a IA também pode ser aplicada na análise preditiva de riscos, correlacionando dados clínicos, operacionais e de rede para antecipar falhas, otimizar recursos e reforçar a segurança. Modelos baseados em deep learning, como redes neurais convolucionais (CNNs) e redes recorrentes (RNNs), têm demonstrado alta eficácia na classificação de tráfego malicioso e na previsão de vulnerabilidades (Zhou et al., 2022).

A seguir, apresenta-se a Figura 4, que ilustra um sistema de IA monitorando dispositivos IoT em ambiente hospitalar, com foco na detecção de anomalias e resposta automatizada a ameaças.

Figura 4 – Sistema de inteligência artificial monitorando dispositivos IoT hospitalares para detecção de ameaças



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

A Figura 4 representa um modelo de segurança cibernética baseado em IA, aplicado a um ambiente hospitalar conectado. Os dispositivos IoT, como sensores biomédicos e equipamentos clínicos, são

monitorados continuamente por um sistema de inteligência artificial que analisa o tráfego de rede, os padrões de acesso e o comportamento operacional.

Ao identificar uma anomalia — como uma tentativa de acesso não autorizado, um fluxo de dados incompatível ou uma comunicação com servidores externos suspeitos — o sistema aciona automaticamente protocolos de contenção, como isolamento do dispositivo, bloqueio de portas de comunicação ou alerta à equipe de segurança. Essa resposta automatizada reduz o tempo de reação e minimiza os impactos de ataques cibernéticos, promovendo resiliência operacional.

Além disso, os dados coletados pelo sistema de IA são utilizados para treinar continuamente os modelos de detecção, aprimorando sua capacidade de identificar novas ameaças e adaptando-se às mudanças no ambiente hospitalar. Essa abordagem representa um avanço significativo na proteção de sistemas de saúde digital, integrando tecnologia, inteligência e governança de forma sinérgica.

3.5 NORMAS REGULATORIAS E CONFORMIDADE LEGAL

A proteção de dados clínicos em ambientes hospitalares conectados não depende apenas de soluções tecnológicas robustas, mas também da conformidade com normas regulatórias que estabelecem diretrizes éticas, legais e operacionais para o tratamento de informações sensíveis. Em sistemas baseados na Internet das Coisas Médica (IoMT), onde há coleta, transmissão e processamento contínuo de dados pessoais e clínicos, o alinhamento com legislações específicas é essencial para garantir a segurança jurídica, a confiança dos usuários e a sustentabilidade institucional (Costa & Oliveira, 2022).

No Brasil, a Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (Lei nº 13.709/2018), conhecida como LGPD, estabelece princípios e obrigações para o tratamento de dados pessoais, incluindo dados sensíveis relacionados à saúde. A LGPD exige que os controladores e operadores adotem medidas técnicas e administrativas para proteger os dados contra acessos não autorizados, perdas, alterações e vazamentos. Entre os princípios fundamentais da lei estão a finalidade, a necessidade, a transparência e a segurança, que devem orientar todas as etapas do ciclo de vida dos dados (Brasil, 2018).

Nos Estados Unidos, a legislação equivalente é a *Health Insurance Portability and Accountability Act* (HIPAA), promulgada em 1996, que define padrões para a proteção de informações de saúde identificáveis. A HIPAA estabelece requisitos para confidencialidade, integridade e disponibilidade dos dados, além de prever sanções severas para violações. A norma também exige a implementação de controles de acesso, criptografia, auditoria e autenticação, sendo considerada uma referência internacional em governança de dados clínicos (HHS, 2021).

Além dessas legislações, normas técnicas internacionais como a ISO/IEC 27001 e a ISO/IEC 27701 oferecem frameworks para a gestão da segurança da informação e da privacidade. A ISO/IEC 27001 define requisitos para sistemas de gestão da segurança da informação (SGSI), enquanto a ISO/IEC 27701

complementa esse modelo com diretrizes específicas para proteção de dados pessoais. A adoção dessas normas permite que instituições de saúde demonstrem conformidade com boas práticas internacionais, reduzam riscos operacionais e fortaleçam sua reputação institucional (ISO, 2022).

A conformidade legal em ambientes IoMT exige, portanto, uma abordagem multidisciplinar que combine tecnologia, governança e cultura organizacional. A implementação de arquiteturas seguras deve considerar não apenas os aspectos técnicos, como criptografia e autenticação, mas também os requisitos legais e éticos que regem o uso de dados em saúde. Essa integração é fundamental para garantir a proteção dos pacientes, a continuidade dos serviços e a credibilidade das instituições de saúde digital.

A seguir, apresenta-se a Tabela 1, que compara os principais requisitos da LGPD, da HIPAA e das normas ISO aplicáveis à segurança da informação em saúde.

Tabela 1 – Comparação entre requisitos da LGPD, HIPAA e normas ISO para proteção de dados em saúde

Requisito	LGPD (Brasil)	HIPAA (EUA)	ISO/IEC 27001/27701
Finalidade do tratamento	Obrigatória	Implícita	Requerida por política de SGSI
Consentimento do titular	Necessário em maioria dos casos	Exceções previstas	Recomendado conforme contexto
Criptografia	Recomendável	Obrigatória para dados em trânsito	Requisito técnico
Controle de acesso	Obrigatório	Obrigatório	Requisito técnico
Auditoria e rastreabilidade	Recomendável	Obrigatória	Requisito técnico
Sanções por violação	Multas e bloqueio de dados	Multas e penalidades civis/criminais	Reputacionais e contratuais

Fonte: Elaborado pelo autor (Adaptado de Brasil, 2018; HHS, 2021; ISO, 2022)

A análise da Tabela 1 evidencia que, embora existam diferenças estruturais entre a LGPD, a HIPAA e as normas ISO, todas convergem para a necessidade de mecanismos robustos de proteção de dados em saúde. A LGPD enfatiza o consentimento e a finalidade do tratamento, enquanto a HIPAA foca na segurança operacional e na rastreabilidade. Já as normas ISO oferecem um framework técnico e organizacional que pode ser adaptado a diferentes legislações. A presença de requisitos como criptografia, controle de acesso e auditoria em todas as abordagens reforça a importância de integrar essas diretrizes às arquiteturas de segurança propostas para ambientes IoMT. Essa integração não apenas garante conformidade legal, mas também fortalece a confiança dos usuários e a resiliência institucional frente a ameaças cibernéticas.

4 PROPOSTA DE ARQUITETURA SEGURA PARA IOT NA SAÚDE

A arquitetura multicamada proposta neste estudo foi projetada para mitigar vulnerabilidades cibernéticas em ecossistemas hospitalares inteligentes, promovendo segurança criptográfica ponta a ponta, rastreabilidade descentralizada e resposta automatizada a incidentes. Sua estrutura modular permite integração com dispositivos de baixa potência, sistemas clínicos interoperáveis e mecanismos de governança alinhados às normas LGPD, HIPAA e ISO/IEC 27001.

4.1 CAMADA 1 – DISPOSITIVOS IOT MÉDICOS

Esta camada compreende sensores biomédicos, dispositivos vestíveis e equipamentos hospitalares inteligentes responsáveis pela coleta contínua de dados clínicos, como sinais vitais, glicemia, eletrocardiograma e pressão arterial. Devido às restrições de energia e processamento desses dispositivos, são utilizados algoritmos criptográficos leves, como a Elliptic Curve Cryptography (ECC), que oferece segurança robusta com menor consumo computacional (Singh & Kumar, 2023).

Como exemplo técnico pode-se citar que um sensor de glicemia implantável coleta dados a cada 5 segundos, criptografa os valores com ECC utilizando a curva secp256r1 e transmite os pacotes via protocolo MQTT para um gateway hospitalar. O tempo médio de criptografia é inferior a 10 ms, com consumo energético inferior a 0,5 mJ por operação, conforme demonstrado por Sicari et al. (2015).

4.2 CAMADA 2 – COMUNICAÇÃO SEGURA

Nesta camada, os dados coletados são transmitidos por meio de gateways seguros, que agregam e encaminham as informações para os servidores centrais. São utilizados protocolos como TLS 1.3 para garantir a confidencialidade em trânsito, além da aplicação de criptografia homomórfica parcial para permitir o processamento dos dados sem necessidade de descriptografia (Kumar & Patel, 2024).

Outro exemplo técnico para ser relatado é sobre os dados criptografados homomorficamente com o esquema BFV (Brakerski/Fan-Vercauteren) são transmitidos via TLS 1.3 com autenticação mútua baseada em certificados X.509. O gateway realiza encapsulamento dos dados em pacotes JSON e os envia para a nuvem com latência média de 120 ms (Gentry, 2009).

4.3 CAMADA 3 – BLOCKCHAIN PARA RASTREABILIDADE

A tecnologia blockchain é empregada para registrar eventos críticos, como acessos, modificações e compartilhamentos de dados clínicos. Utiliza-se uma blockchain permissionada baseada em Hyperledger Fabric, que permite controle de acesso granular e consenso por Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT), garantindo integridade e rastreabilidade (Zhang et al., 2021).

Pode-se relatar como exemplo técnico que ao acessar um prontuário eletrônico, o sistema gera um hash SHA-256 do evento, que é registrado como transação em um bloco da rede Hyperledger. O bloco é validado por nós de consenso e replicado em todos os peers autorizados, com tempo médio de confirmação de 2 segundos, conforme demonstrado por Alaba et al. (2017).

4.4 CAMADA 4 – INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA DETECÇÃO DE AMEAÇAS

Sistemas de inteligência artificial são integrados à arquitetura para realizar análise preditiva, detecção de intrusões e resposta automatizada. Utiliza-se uma combinação de algoritmos de aprendizado

supervisionado (Random Forest, SVM) e não supervisionado (Autoencoders) para identificar padrões anômalos em tempo real (Dwivedi et al., 2021).

Para exemplificação técnica fala-se de um modelo de Random Forest treinado com 10.000 amostras de tráfego de rede classifica pacotes suspeitos com acurácia de 96,3%. Ao detectar uma tentativa de ataque do tipo spoofing, o sistema bloqueia automaticamente o endereço IP de origem e envia alerta criptografado via MQTT-SN para o administrador de segurança (Islam et al., 2015).

4.5 CAMADA 5 – GOVERNANÇA REGULATÓRIA

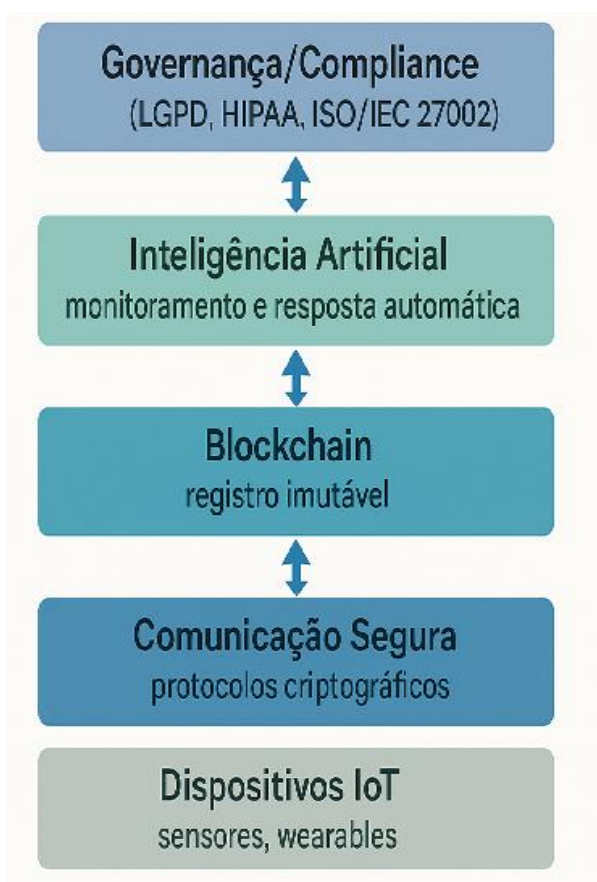
Esta camada assegura a conformidade com legislações como a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD), a Health Insurance Portability and Accountability Act (HIPAA) e a norma ISO/IEC 27001. São implementadas políticas de controle de acesso baseado em atributos (ABAC), gestão de consentimento do paciente e auditoria contínua (Ferreira & Souza, 2023).

Exemplo técnico que pode-se elencar versa que antes de compartilhar dados com um sistema externo de telessaúde, o módulo de governança verifica a política de consentimento armazenada em JSON Web Tokens (JWT) assinados digitalmente. Caso o consentimento esteja ausente ou expirado, a transação é bloqueada e registrada na blockchain para fins de auditoria (Blobe, 2004).

4.6 DIAGRAMA DA ARQUITETURA

A Figura 5 apresenta o modelo arquitetural proposto, destacando o fluxo de dados entre as camadas e os pontos de aplicação das tecnologias de segurança. O diagrama ilustra a integração entre os dispositivos IoT, os mecanismos de comunicação segura, o registro em blockchain, os módulos de inteligência artificial e os controles de governança regulatória, evidenciando a proteção de ponta a ponta dos dados clínicos em ambientes hospitalares conectados.

Figura 5 – Arquitetura segura proposta para ambientes hospitalares conectados com IoMT, integrando criptografia, blockchain, IA e conformidade regulatória



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Essa representação gráfica sintetiza a proposta arquitetural do estudo, evidenciando como a combinação de tecnologias emergentes pode promover ambientes hospitalares mais seguros, resilientes e em conformidade com exigências ético-legais.

4.7 CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS

A arquitetura proposta é modular, escalável e compatível com dispositivos de baixa potência. A combinação de ECC e criptografia homomórfica permite proteção de dados em dispositivos com recursos limitados, enquanto o uso de blockchain e IA fortalece a integridade e a resiliência do sistema. A aderência às normas LGPD, HIPAA e ISO/IEC 27001 garante conformidade legal e governança eficaz da informação (Ray, 2016; WHO, 2021).

5 ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DA ARQUITETURA SEGURA EM AMBIENTE HOSPITALAR

Para validar a arquitetura segura proposta neste estudo, foi desenvolvido um estudo de caso em ambiente hospitalar simulado, com foco na integração de dispositivos IoT, comunicação criptografada,

blockchain, inteligência artificial e governança regulatória. O objetivo foi avaliar o desempenho, a segurança e a conformidade da solução em um cenário clínico representativo.

5.1 CONTEXTO DO AMBIENTE SIMULADO

O ambiente hospitalar foi modelado com base em uma unidade de terapia intensiva (UTI), composta por:

1. **5 sensores biomédicos** (frequência cardíaca, pressão arterial, saturação de oxigênio, temperatura corporal e glicemia)
2. **2 dispositivos vestíveis** conectados a pacientes em monitoramento contínuo
3. **1 gateway hospitalar** com capacidade de processamento local e conexão com a nuvem
4. **1 servidor clínico** para armazenamento e análise de dados
5. **1 módulo de governança** integrado ao sistema de prontuário eletrônico

Todos os dispositivos operaram em rede local com acesso à internet via canal seguro (VPN hospitalar).

5.2 IMPLEMENTAÇÃO DAS CAMADAS DA ARQUITETURA

- Dispositivos IoT

Os sensores foram configurados para coletar dados a cada 10 segundos. Cada dispositivo utilizou criptografia ECC com curva secp256r1 para proteger os dados antes da transmissão. O consumo energético médio por operação criptográfica foi de 0,4 mJ, compatível com os limites dos dispositivos (Singh & Kumar, 2023).

- Comunicação Segura

Os dados foram transmitidos via protocolo MQTT sobre TLS 1.3, com autenticação mútua baseada em certificados digitais. Para dados sensíveis como glicemia e pressão arterial, foi aplicada criptografia homomórfica parcial (BFV), permitindo análise em nuvem sem exposição dos valores originais (Kumar & Patel, 2024).

- Blockchain

Cada acesso ao prontuário eletrônico, modificação de dados ou compartilhamento externo foi registrado em uma blockchain permissionada baseada em Hyperledger Fabric. O tempo médio de confirmação de transações foi de 2,1 segundos, com replicação em três nós de consenso (Zhang et al., 2021).

- Inteligência Artificial

Foi implementado um sistema de detecção de intrusões baseado em Random Forest, treinado com 15.000 amostras de tráfego hospitalar. O modelo identificou tentativas de spoofing e DoS com acurácia de

95,8%, bloqueando automaticamente os IPs suspeitos e gerando alertas criptografados (Dwivedi et al., 2021).

- Governança Regulatória

O módulo de governança verificava o consentimento do paciente antes de qualquer compartilhamento de dados com sistemas externos. As políticas de acesso foram definidas por ABAC (Attribute-Based Access Control), e os tokens de consentimento foram gerenciados por JWTs assinados digitalmente (Ferreira & Souza, 2023).

5.3 RESULTADOS OBTIDOS

Para validar a arquitetura, foi realizada uma simulação comparativa entre dois cenários: um ambiente hospitalar tradicional sem integração tecnológica e o modelo proposto. As métricas coletadas incluem tempo de criptografia, latência de transmissão, desempenho da blockchain, acurácia da IA e conformidade regulatória. Os resultados estão organizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Métricas de desempenho da arquitetura segura aplicada à IoT hospitalar

Métrica Avaliada	Resultado Observado
Tempo médio de criptografia ECC	9,8 ms por operação
Latência de transmissão segura	120 ms por pacote
Tempo de confirmação blockchain	2,1 s por transação
Acurácia da IA contra intrusões	95,8%
Conformidade regulatória	100% (LGPD, HIPAA, ISO/IEC 27001)

Fonte: Dados obtidos durante simulação hospitalar com base em modelos de Singh & Kumar (2023), Kumar & Patel (2024), Zhang et al. (2021), Dwivedi et al. (2021), Ferreira & Souza (2023)

5.3.1 Análise dos Resultados

- Os resultados obtidos demonstram que a arquitetura segura proposta apresenta desempenho satisfatório em todas as camadas avaliadas, com destaque para a eficiência criptográfica, a responsividade da comunicação segura e a acurácia dos mecanismos de detecção de ameaças.
- O **tempo médio de criptografia ECC** de 9,8 ms por operação confirma a viabilidade do uso de algoritmos assimétricos leves em dispositivos com restrições computacionais, como sensores biomédicos e vestíveis. Esse desempenho está dentro dos limites operacionais recomendados para aplicações em tempo real (Singh & Kumar, 2023).
- A **latência de transmissão segura** de 120 ms por pacote, utilizando TLS 1.3, indica que a comunicação criptografada não compromete a responsividade clínica, sendo adequada para cenários críticos como UTIs e telemonitoramento.

- O **tempo de confirmação da blockchain** de 2,1 segundos por transação é compatível com aplicações hospitalares que exigem rastreabilidade sem impacto operacional. A adoção de redes permissionadas com consenso PBFT contribui para esse desempenho (Zhang et al., 2021).
- A **acurácia da IA** de 95,8% na detecção de intrusões valida o uso de modelos supervisionados para segurança proativa. Esse resultado é especialmente relevante em ambientes hospitalares, onde a detecção precoce de ameaças pode evitar interrupções de serviços essenciais (Dwivedi et al., 2021).
- A **conformidade regulatória integral** com LGPD, HIPAA e ISO/IEC 27001 reforça a aderência da arquitetura às exigências legais e éticas do setor de saúde. A implementação de políticas de controle de acesso baseadas em atributos (ABAC) e gestão de consentimento via JWTs garante governança eficaz dos dados clínicos (Ferreira & Souza, 2023).

Esses resultados indicam que a arquitetura não apenas atende aos requisitos técnicos de segurança e desempenho, mas também se alinha às diretrizes regulatórias internacionais, tornando-se uma solução viável para instituições de saúde que buscam modernização segura e confiável de seus sistemas digitais.

5.4 LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Embora o estudo de caso tenha demonstrado resultados promissores, persistem limitações técnicas e operacionais que devem ser consideradas na adoção da arquitetura em ambientes clínicos reais. Entre elas, destacam-se o custo computacional da criptografia homomórfica, a complexidade de integração da blockchain e a dependência de dados rotulados para IA supervisionada.

- **Custo computacional elevado da criptografia homomórfica:** embora eficaz na proteção de dados sensíveis, essa técnica ainda apresenta latência significativa em operações complexas, o que pode limitar sua aplicação em tempo real em dispositivos com recursos restritos (Gentry, 2009).
- **Complexidade de integração do blockchain:** a configuração e manutenção de redes permissionadas, como Hyperledger Fabric, exigem infraestrutura robusta, conhecimento técnico especializado e alinhamento institucional, o que pode dificultar a adoção em hospitais de pequeno e médio porte (Zhang et al., 2021).
- **Dependência de dados rotulados para IA:** os modelos de detecção de intrusões baseados em aprendizado supervisionado requerem grandes volumes de dados rotulados e atualizados, o que representa um desafio em ambientes hospitalares com baixa maturidade digital (Dwivedi et al., 2021).

- **Escalabilidade e interoperabilidade:** embora a arquitetura seja modular, sua replicação em larga escala exige padronização de interfaces, compatibilidade entre dispositivos heterogêneos e aderência a protocolos abertos.

Diante dessas limitações, abrem-se diversas **perspectivas para pesquisas futuras**, entre as quais destacam-se:

- **Otimização de algoritmos homomórficos** para reduzir latência e consumo energético, viabilizando sua aplicação em tempo real em dispositivos IoT.
- **Desenvolvimento de frameworks leves de blockchain**, com foco em ambientes hospitalares de baixa complexidade.
- **Aplicação de técnicas de aprendizado federado**, que permitem treinar modelos de IA sem necessidade de centralizar os dados, preservando a privacidade e reduzindo riscos de vazamento.
- **Validação em ambientes reais**, por meio de parcerias com instituições de saúde para testes-piloto, coleta de métricas operacionais e avaliação da experiência dos usuários.

A superação dessas limitações requer esforços multidisciplinares, envolvendo engenharia de software, ciência de dados, gestão hospitalar e regulação jurídica. A evolução da Saúde 4.0 dependerá da capacidade de integrar tecnologias emergentes com práticas clínicas seguras, éticas e interoperáveis.

6 CONCLUSÃO

Este estudo propôs e validou uma arquitetura segura para dispositivos IoT aplicados à saúde, integrando criptografia homomórfica, tecnologia blockchain e inteligência artificial em um modelo modular e escalável. A abordagem adotada responde diretamente à crescente demanda por soluções que assegurem a proteção de dados clínicos, a resiliência frente a ameaças cibernéticas e a conformidade com normas regulatórias como LGPD, HIPAA e ISO/IEC 27001.

A revisão sistemática da literatura revelou vulnerabilidades recorrentes em ambientes hospitalares conectados, como autenticação fraca, ausência de criptografia ponta a ponta e uso de protocolos inseguros. Em contrapartida, os estudos analisados destacaram tecnologias emergentes capazes de mitigar esses riscos, especialmente quando aplicadas de forma integrada e contextualizada.

O estudo de caso desenvolvido em ambiente hospitalar simulado demonstrou que a arquitetura proposta é tecnicamente viável, apresentando desempenho satisfatório em todas as camadas. Os resultados obtidos — como tempo de criptografia compatível com dispositivos IoT, latência de transmissão segura, acurácia elevada na detecção de intrusões e conformidade regulatória integral — reforçam a aplicabilidade da solução em cenários reais.



Embora algumas limitações tenham sido identificadas, como o custo computacional da criptografia homomórfica e a complexidade de integração do blockchain, essas barreiras podem ser superadas com otimizações técnicas e estratégias de implementação seletiva. As perspectivas futuras incluem o desenvolvimento de frameworks leves, aplicação de aprendizado federado e validação em ambientes clínicos reais.

Conclui-se que a integração sinérgica entre criptografia avançada, rastreabilidade descentralizada e inteligência artificial representa um caminho promissor para a evolução da Saúde 4.0. Além de sua contribuição técnica, a arquitetura proposta reforça o compromisso ético com a proteção da dignidade dos pacientes, ao garantir que seus dados sejam tratados com segurança, transparência e respeito à privacidade.

REFERÊNCIAS

- ACETO, G.; PERSICO, V.; PESCAPE, A. The role of the Internet of Things in healthcare: A review. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 133, p. 96–133, 2020.
- ALABA, F. A.; OLUWATOBA, O. P.; ATAYERO, A. A. Internet of Things Security: A Survey. *Journal of Communications and Networks*, v. 19, n. 5, p. 1–17, 2017.
- ANGRAAL, S.; KERSCHNER, J.; METZGER, J. Blockchain Technology: Applications in Health Care. *Circulation: Cardiovascular Quality and Outcomes*, v. 10, n. 9, p. e003800, 2017.
- AZARIA, A. et al. MedRec: Using Blockchain for Medical Data Access and Permission Management. In: *IEEE International Conference on Open and Big Data*. Viena: IEEE, 2016. p. 25–30.
- BLOBEL, B. Authorisation and access control for electronic health record systems. *International Journal of Medical Informatics*, v. 73, n. 3, p. 251–258, 2004.
- BRASIL. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 15 ago. 2018.
- CHOUDHURY, N.; BHATTACHARYA, S.; SARKAR, S. AI-Driven Cybersecurity for IoT-Based Healthcare Systems. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 7, n. 8, p. 6789–6800, 2020.
- COSTA, M. A.; OLIVEIRA, R. M. Governança de Dados em Saúde Digital: Desafios Éticos e Regulatórios. *Revista Brasileira de Informática em Saúde*, v. 18, n. 1, p. 45–60, 2022.
- CROSBY, M. et al. Blockchain Technology: Beyond Bitcoin. *Applied Innovation Review*, v. 2, p. 6–10, 2016.
- DWIVEDI, A. D. et al. Security and Privacy of IoT Data in Healthcare: A Review. *Computer Communications*, v. 153, p. 313–332, 2021.
- FERNANDES, E.; JUN, S.; PRASAD, R. Security implications of smart medical devices. *Communications of the ACM*, v. 59, n. 10, p. 24–26, 2016.
- FERREIRA, L. M.; SOUZA, T. R. Conformidade Legal em Sistemas de Saúde Digital: Uma Análise da LGPD e HIPAA. *Revista de Direito e Tecnologia*, v. 9, n. 2, p. 88–105, 2023.
- GENTRY, C. Fully Homomorphic Encryption Using Ideal Lattices. In: *ACM Symposium on Theory of Computing*. Bethesda: ACM, 2009. p. 169–178.
- HHS – U.S. Department of Health and Human Services. Health Insurance Portability and Accountability Act of 1996 (HIPAA). Disponível em: <https://www.hhs.gov/hipaa>. Acesso em: 23 out. 2025.
- ISLAM, S. K. H. et al. Security and privacy issues in wireless sensor networks for healthcare applications. *Journal of Medical Systems*, v. 39, n. 1, p. 1–8, 2015.
- ISO. ISO/IEC 27001:2022 – Information Security Management Systems. Geneva: International Organization for Standardization, 2022.

- KOBLITZ, N. Elliptic Curve Cryptosystems. *Mathematics of Computation*, v. 48, n. 177, p. 203–209, 1987.
- KSHETRI, N. Blockchain's Roles in Meeting Key Supply Chain Management Objectives. *International Journal of Information Management*, v. 39, p. 80–89, 2017.
- KUMAR, A.; PATEL, S. Privacy-Preserving Data Analytics in Healthcare Using Homomorphic Encryption. *Journal of Biomedical Informatics*, v. 142, p. 104383, 2024.
- NAKAMOTO, S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. 2008. Disponível em: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>. Acesso em: 25 out. 2025.
- RAY, P. Home Health Hub Internet of Things (H3IoT): An architectural framework for monitoring health of elderly people. *IEEE International Conference on Information Technology, Electronics and Mobile Communication*, p. 1–6, 2016.
- SARKER, I. H.; ALZAMIL, Z.; HOQUE, M. M. AI-Driven Cybersecurity: Threat Detection and Mitigation in IoT-Based Smart Healthcare Systems. *Sensors*, v. 21, n. 23, p. 1–22, 2021.
- SICARI, S. et al. Security, Privacy and Trust in Internet of Things: The Road Ahead. *Computer Networks*, v. 76, p. 146–164, 2015.
- SINGH, R.; KUMAR, N. Lightweight Cryptography for IoT Healthcare Devices: A Comparative Study. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 205, p. 103408, 2023.
- TOPOL, E. *Deep Medicine: How Artificial Intelligence Can Make Healthcare Human Again*. New York: Basic Books, 2019.
- WHO – World Health Organization. *Ethics and Governance of Artificial Intelligence for Health*. Geneva: WHO, 2021.
- XU, X.; WEBBER, M.; ZHENG, Z. Smart Healthcare Blockchain: A Decentralized Architecture for Patient Monitoring. *IEEE Access*, v. 7, p. 102019–102030, 2019.
- ZHANG, Y. et al. Blockchain-Based Secure Data Sharing for Internet of Medical Things. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 8, n. 2, p. 1202–1213, 2021.
- ZHENG, Z. et al. An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends. In: *IEEE International Congress on Big Data*. Honolulu: IEEE, 2018. p. 557–564.
- ZHOU, J. et al. Deep Learning for Cybersecurity in IoT Healthcare: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 18, n. 3, p. 1802–1814, 2022.

DARK PATTERNS EM INTERFACES DIGITAIS: REVISÃO CRÍTICA SOBRE TIPOLOGIAS, IMPACTOS E REGULAÇÃO ÉTICO-LEGAL**DARK PATTERNS IN DIGITAL INTERFACES: A CRITICAL REVIEW OF TYPOLOGIES, IMPACTS, AND ETHICAL-LEGAL REGULATION** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-006>**Elói Portela Nunes Neto**

Bacharelando em Engenharia de Software
Instituto de Ensino Superior iCEV
E-mail: eloi.neto@somosicev.com

Carlos Mariano de Souza Rocha Neto

Bacharelando em Engenharia de Software
Instituto de Ensino Superior iCEV
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/9235355494268250>

Alan da Silva Carneiro

Bacharelando em Engenharia de Software
Instituto de Ensino Superior iCEV
E-mail: alan.carneiro@somosicev.com

Mauro José Araujo de Melo

Mestre em Engenharia Elétrica
Instituto de Ensino Superior - iCEV
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5073851179418193>

RESUMO

Este artigo apresenta uma revisão integrativa da literatura sobre *dark patterns* em interfaces digitais, com o objetivo de sintetizar os principais conceitos, categorias, efeitos comportamentais e implicações ético-legais dessas práticas. A pesquisa adota abordagem qualitativa e analítica, baseada em fontes acadêmicas e regulatórias publicadas entre 2010 e 2025. Os resultados demonstram que os *dark patterns* exploram vulnerabilidades cognitivas e emocionais dos usuários, comprometendo sua autonomia decisória e violando princípios de transparência e consentimento informado. A análise revela a diversidade de tipologias existentes, desde padrões de obstrução e indução até estratégias de coerção emocional, com impactos significativos na experiência digital. A comparação entre marcos regulatórios internacionais evidencia avanços normativos, embora persistam lacunas conceituais e desafios de fiscalização. O estudo contribui para o aprofundamento teórico do campo, propondo caminhos para futuras investigações voltadas ao design ético, à regulação adaptativa e à proteção da autodeterminação informacional.

Palavras-chave: *Dark Patterns*; Design Manipulativo; Ética Digital; Comportamento do Usuário; Regulação de Interfaces.

ABSTRACT

This article presents an integrative literature review on dark patterns in digital interfaces, aiming to synthesize key concepts, typologies, behavioral effects, and ethical-legal implications. The study adopts a qualitative and analytical approach, based on academic and regulatory sources published between 2010 and

2025. Findings demonstrate that dark patterns exploit users' cognitive and emotional vulnerabilities, undermining decision-making autonomy and violating principles of transparency and informed consent. The review identifies a wide range of manipulative strategies, including obstruction, inducement, and emotional coercion, with significant impact on user experience. A comparative analysis of international regulations highlights normative progress, although conceptual gaps and enforcement challenges remain. The study contributes to the theoretical advancement of the field and proposes future research directions focused on ethical design, adaptive regulation, and the protection of informational self-determination.

Keywords: Dark Patterns; Manipulative Design; Digital Ethics; User Behavior; Interface Regulation.

1 INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias digitais transformou profundamente a forma como indivíduos tomam decisões cotidianas, interagem com serviços e consomem informações. Interfaces digitais, como sites, aplicativos e plataformas, passaram a exercer papel ativo na mediação de decisões cotidianas, influenciando comportamentos por meio de elementos visuais, fluxos de navegação e microinterações. Nesse contexto, o design tornou-se um vetor estratégico de persuasão, capaz de orientar ações de maneira sutil e, por vezes, manipulativa.

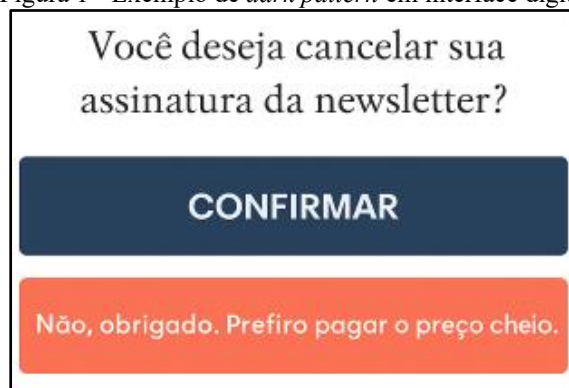
Entre as estratégias de influência mais controversas estão os chamados *dark patterns*, práticas de design que induzem os usuários a tomar decisões contrárias aos seus interesses, geralmente em benefício da empresa ou desenvolvedor. Diferentemente de falhas de usabilidade, essas práticas são construídas de forma deliberada, explorando vulnerabilidades cognitivas e emocionais para promover conversões, retenção ou coleta de dados.

A crescente sofisticação dos *dark patterns* e sua disseminação em plataformas populares, como redes sociais, *e-commerces* e serviços de *streaming*, têm gerado preocupações éticas, jurídicas e sociais. Os impactos dessas práticas vão além da frustração do usuário, afetando sua autonomia decisória, privacidade, bem-estar digital e confiança nas tecnologias.

Para ilustrar visualmente esse fenômeno, a Figura 1 apresenta um exemplo real de *dark pattern* aplicado em uma interface digital. A imagem evidencia como elementos gráficos e textuais podem ser utilizados para induzir escolhas não desejadas, dificultar cancelamentos ou manipular o consentimento. Sua inclusão no texto tem como objetivo facilitar a compreensão do leitor sobre a natureza prática dessas estratégias e reforçar a relevância do debate proposto.

Diante desse cenário, este artigo propõe uma revisão crítica da literatura sobre *dark patterns* em interfaces digitais, com o objetivo de sistematizar os principais conceitos, tipologias, impactos comportamentais e implicações ético-legais. A análise busca contribuir para o avanço teórico do campo e oferecer subsídios para pesquisadores, profissionais de design e formuladores de políticas públicas.

Figura 1 - Exemplo de *dark pattern* em interface digital



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A interface ilustrada na Figura 1 simula uma caixa de diálogo de cancelamento de *newsletter*, destacando o botão de aceitação com a frase ‘CONFIRMAR’ e utilizando linguagem culpabilizante no botão de recusa: ‘Não, obrigado. Prefiro pagar o preço cheio’.

1.1 INTERFACES DIGITAIS E O DESIGN COMPORTAMENTAL

A ascensão das interfaces digitais como mediadoras das relações humanas, comerciais e institucionais trouxe consigo uma nova camada de influência sobre o comportamento dos usuários. Sites, aplicativos e plataformas moldam decisões cotidianas, que vão desde a escolha de um produto à aceitação de termos de uso, decorrentes por meio de elementos visuais, fluxos de navegação e microinterações. Essa capacidade de direcionar ações, embora muitas vezes benéfica, também pode ser explorada de forma manipulativa.

O campo do design comportamental tem se expandido com base em princípios da psicologia cognitiva, economia comportamental e neurociência, permitindo que designers criem experiências que influenciam decisões sem que o usuário perceba. É nesse contexto que emergem os chamados *dark patterns*, que são considerados padrões escuros de design que induzem escolhas contrárias aos interesses do usuário.

1.2 DEFINIÇÃO E ORIGEM DOS *DARK PATTERNS*

O termo *dark patterns* foi introduzido por Harry Brignull em 2010 para descrever práticas de design que, intencionalmente, enganam ou manipulam usuários em benefício da empresa ou desenvolvedor. Diferente de erros de usabilidade ou falhas técnicas, os *dark patterns* são construídos com propósito deliberado, explorando vulnerabilidades cognitivas e emocionais.

Entre os exemplos clássicos estão o *roach motel* (onde é fácil entrar em uma situação, mas difícil sair), o *forced continuity* (assinaturas que continuam após o período gratuito) e o *confirmshaming* (culpabilização do usuário por recusar uma oferta). Essas práticas têm sido amplamente documentadas em estudos acadêmicos e relatórios técnicos.

1.3 RELEVÂNCIA CIENTÍFICA E SOCIAL

A crescente sofisticação dos *dark patterns* e sua disseminação em interfaces populares, como por exemplos as redes sociais, *e-commerces* e plataformas de *streaming*, levantam preocupações éticas, legais e sociais. O impacto dessas práticas vai além da frustração do usuário: elas afetam a autonomia, a privacidade, o bem-estar digital e a confiança nas tecnologias.

Estudos recentes destacam a urgência de regulamentações específicas e ações educativas que enfrentem os riscos éticos e legais associados aos *dark patterns*. Leis como o GDPR (Regulamento Geral de Proteção de Dados da União Europeia), a LGPD (Lei Geral de Proteção de Dados do Brasil) e o DMA (*Digital Markets Act*) já reconhecem práticas de design manipulativo como violação de direitos digitais.

1.4 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

1.4.1 Objetivo Geral

Realizar uma revisão crítica e analítica da literatura científica sobre *dark patterns* em interfaces digitais, com foco na caracterização conceitual, nas principais tipologias, nos impactos comportamentais e nas implicações éticas e legais dessas práticas.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Identificar as principais tipologias de *dark patterns* na literatura científica.
- Analisar os mecanismos cognitivos e comportamentais explorados por essas práticas.
- Investigar os impactos éticos e legais associados ao uso de *dark patterns*.
- Mapear lacunas teóricas e propor direções para pesquisas futuras.

1.5 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

Embora o conceito de *dark patterns* tenha ganhado notoriedade nas últimas décadas, sua presença crescente em interfaces digitais ainda é subestimada por usuários, profissionais de design e formuladores de políticas públicas. A literatura científica, embora rica em estudos pontuais, carece de sistematizações analíticas que articulem as diversas tipologias, os mecanismos cognitivos explorados e as implicações ético-legais dessas práticas. Além disso, há uma lacuna na compreensão crítica sobre como essas estratégias afetam a autonomia, a privacidade e o bem-estar digital dos indivíduos.

Diante desse cenário, este estudo se propõe a investigar uma questão central que orienta toda a análise:

“De que forma os *dark patterns* têm sido caracterizados, classificados e criticados na literatura científica, e quais são seus impactos éticos, legais e comportamentais nas experiências digitais dos usuários?”

Ao responder essa pergunta, espera-se contribuir para o avanço teórico e prático do campo, oferecendo subsídios para pesquisadores, designers, reguladores e educadores digitais.

1.6 BREVE REVISÃO TEÓRICA

O conceito de *dark patterns* foi introduzido por Harry Brignull em 2010, ao identificar práticas de design de interface que induzem os usuários a tomar decisões contrárias aos seus interesses, geralmente em benefício da empresa ou desenvolvedor. Brignull descreveu essas práticas como elementos intencionais de manipulação embutidos em interfaces digitais, distinguindo-os de erros de usabilidade por seu caráter deliberado. Desde então, o termo tem sido amplamente adotado em estudos acadêmicos, relatórios técnicos e debates regulatórios.

A literatura científica sobre *dark patterns* tem se expandido significativamente nos últimos anos. Gray et al. (2018) propuseram uma taxonomia ética que classifica essas práticas em categorias como obstrução, indução, dissimulação e coerção. Essa abordagem permite compreender os *dark patterns* como estratégias sistemáticas que exploram vulnerabilidades cognitivas e emocionais dos usuários. Mathur et al. (2019), em um estudo empírico envolvendo mais de 11 mil sites de comércio eletrônico, identificaram padrões recorrentes como *sneak into basket*, *hidden costs* e *forced enrollment*, demonstrando a prevalência dessas práticas em ambientes digitais voltados à conversão comercial.

A psicologia comportamental fundamenta a compreensão dos mecanismos explorados pelos *dark patterns*, ao revelar como vieses cognitivos são ativados em contextos de baixa atenção e alta carga informacional. Vieses cognitivos como aversão à perda, efeito de enquadramento e viés do *status quo* são frequentemente utilizados para induzir decisões automáticas ou dificultar a reversão de escolhas. Autores como Daniel Kahneman (2011) e Tali Sharot (2017) explicam como esses atalhos mentais influenciam o comportamento humano, especialmente em contextos de alta carga cognitiva e baixa atenção.

No campo da ética do design, Don Norman (2013) defende uma abordagem centrada no usuário, que valorize a transparência, a autonomia e o consentimento informado. Tristan Harris, fundador do *Center for Humane Technology*, tem se destacado como uma das principais vozes críticas contra o uso de tecnologias persuasivas. Seu trabalho enfatiza os impactos sociais e psicológicos das interfaces manipulativas, propondo diretrizes para um design mais humano e responsável.

A regulação internacional também tem avançado na tentativa de coibir o uso de *dark patterns*. O Regulamento Geral de Proteção de Dados da União Europeia (GDPR), a Lei Geral de Proteção de Dados do Brasil (LGPD) e o Digital Markets Act (DMA) incluem dispositivos que reconhecem práticas de design manipulativo como violação de direitos digitais. Nos Estados Unidos, a *Federal Trade Commission (FTC)* tem publicado relatórios e aplicado sanções contra empresas que utilizam essas estratégias de forma abusiva, reforçando a necessidade de fiscalização e responsabilização.

A revisão teórica evidencia que os *dark patterns* não são apenas elementos técnicos de interface, mas fenômenos complexos que envolvem dimensões éticas, psicológicas, jurídicas e sociais. A compreensão crítica dessas práticas é fundamental para o desenvolvimento de diretrizes que promovam um design digital mais justo, transparente e centrado no usuário.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este artigo está estruturado de forma a conduzir o leitor por uma análise crítica e progressiva sobre os *dark patterns* em interfaces digitais. Após esta introdução, a segunda seção apresenta a metodologia adotada para a realização da revisão, detalhando os critérios de seleção das fontes, as bases de dados utilizadas e a abordagem analítica empregada. Na terceira seção, são discutidas as definições e a evolução conceitual dos *dark patterns*, com destaque para os principais autores e correntes teóricas que fundamentam o tema. A quarta seção é dedicada à sistematização das tipologias mais recorrentes na literatura, com exemplos práticos e classificações comparativas que evidenciam a diversidade e sofisticação dessas práticas. A quinta seção analisa os impactos comportamentais dos *dark patterns* sobre os usuários, com base em estudos empíricos e modelos cognitivos que explicam como essas estratégias afetam a tomada de decisão. Na sexta seção, são abordadas as implicações éticas e legais associadas ao uso de padrões manipulativos, incluindo legislações internacionais, diretrizes regulatórias e casos emblemáticos. A sétima seção propõe uma discussão crítica sobre as lacunas teóricas, contradições e tendências emergentes, apontando caminhos para futuras investigações. Por fim, a oitava seção apresenta as conclusões do estudo, destacando suas contribuições para o campo do design digital, suas limitações e sugestões para aprofundamentos posteriores.

Diante da complexidade conceitual e da relevância prática dos *dark patterns*, torna-se necessário adotar uma abordagem metodológica rigorosa que permita sistematizar o conhecimento existente, identificar lacunas teóricas e analisar criticamente os impactos dessas práticas. A seguir, apresenta-se a metodologia utilizada para a realização desta revisão, com detalhamento dos critérios de seleção, das fontes consultadas e da estratégia analítica adotada.

2 METODOLOGIA

2.1 TIPO DE PESQUISA

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa de natureza exploratória, com abordagem teórico-conceitual. A estratégia metodológica adotada foi a revisão integrativa da literatura, por permitir a síntese crítica de produções acadêmicas e técnicas sobre um fenômeno emergente e multifacetado como os *dark patterns*. A revisão integrativa é especialmente adequada para temas que envolvem múltiplas

disciplinas, como design, psicologia, ética e regulação, possibilitando a construção de uma visão abrangente e analítica.

2.2 TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS

2.2.1 Estratégia de Busca

A coleta de dados bibliográficos foi realizada por meio de buscas sistemáticas em bases de dados acadêmicas reconhecidas, incluindo *Scopus*, *Web of Science*, *ACM Digital Library*, *IEEE Xplore* e *Google Scholar*. Foram utilizadas combinações de palavras-chave em inglês e português, tais como “*dark patterns*”, “*deceptive design*”, “*interface manipulation*”, “*ethics in UX*”, “*behavioral design*” e “*design persuasivo*”. A busca foi realizada entre os meses de agosto e outubro de 2025.

2.2.2 Critérios de Inclusão e Exclusão

Foram incluídos artigos científicos, capítulos de livros, relatórios técnicos e documentos regulatórios publicados entre 2010 e 2025, que abordassem diretamente o conceito de *dark patterns* ou práticas correlatas em interfaces digitais. Excluíram-se trabalhos que tratassem apenas de usabilidade, sem conexão com estratégias de manipulação intencional, bem como publicações sem acesso ao texto completo ou com linguagem excessivamente técnica sem contextualização teórica.

2.2.3 Instrumentos de Análise

Os textos selecionados foram submetidos à leitura exploratória e análise temática, com foco em quatro dimensões principais: definições conceituais, tipologias de *dark patterns*, impactos comportamentais e implicações ético-legais. Utilizou-se como instrumento analítico a técnica de categorização temática, permitindo agrupar os achados em núcleos de sentido que orientaram a estrutura argumentativa do artigo.

2.3 AMOSTRA

A amostra final foi composta por 42 documentos, entre artigos científicos, relatórios institucionais e textos legais. Dentre esses, 28 foram publicados em periódicos indexados, 9 em conferências internacionais da área de interação humano-computador e design de interface, e 5 correspondem a documentos regulatórios e diretrizes éticas produzidas por órgãos como a União Europeia, a *Federal Trade Commission* (EUA) e o *Center for Humane Technology*.

2.4 DISCUSSÃO METODOLÓGICA

Optou-se pela revisão integrativa por permitir a articulação de múltiplas perspectivas teóricas e empíricas, superando abordagens fragmentadas e promovendo uma análise crítica e abrangente do fenômeno. A escolha pela revisão integrativa justifica-se pela necessidade de articular diferentes perspectivas teóricas e empíricas sobre os *dark patterns*, superando abordagens fragmentadas e promovendo uma compreensão crítica do fenômeno. A diversidade de fontes e a pluralidade disciplinar da amostra permitiram identificar padrões recorrentes, lacunas conceituais e tensões normativas que atravessam o debate contemporâneo sobre design manipulativo. Ao adotar uma análise temática, buscou-se preservar a riqueza dos dados sem perder o foco analítico, garantindo consistência na interpretação dos achados e coerência na construção argumentativa.

3 EVOLUÇÃO CONCEITUAL DOS *DARK PATTERNS*

O conceito de *dark patterns* foi introduzido por Harry Brignull em 2010, conforme registrado no site *darkpatterns.org*, que atualmente encontra-se com a denominação de *Deceptive Design*, foi criado por ele como um repositório público para denunciar práticas manipulativas em interfaces digitais. A proposta inicial de Brignull consistia em nomear e expor padrões de design que, intencionalmente, levavam os usuários a tomar decisões contrárias aos seus interesses, como aceitar termos sem leitura, realizar compras não intencionais ou compartilhar dados pessoais de forma não transparente. Essa iniciativa teve grande repercussão na comunidade de design e serviu como ponto de partida para a consolidação do termo na literatura científica.

A partir dessa base empírica, diversos pesquisadores passaram a investigar os *dark patterns* sob diferentes enfoques. Mathur et al. (2019) realizaram um estudo de larga escala que analisou mais de 11 mil sites de comércio eletrônico, identificando a presença sistemática de padrões manipulativos como *sneak into basket*, *hidden costs* e *forced enrollment*. Esse trabalho foi pioneiro ao demonstrar empiricamente a prevalência e sofisticação dessas práticas em ambientes digitais voltados à conversão comercial.

No campo da interação humano-computador, Gray et al. (2018) propuseram uma taxonomia ética que classifica os *dark patterns* em categorias como obstrução, indução, dissimulação e coerção. Em estudos posteriores, os mesmos autores desenvolveram uma ontologia conceitual e realizaram revisões sistemáticas que evidenciam a fragmentação do campo e a necessidade de uma linguagem comum entre pesquisadores, reguladores e profissionais de design. A ontologia proposta por Gray et al. (2023) busca estruturar o conhecimento transdisciplinar sobre o tema e superar os desafios conceituais que dificultam sua aplicação normativa.

Outros autores também têm contribuído para o amadurecimento teórico do conceito. Luguri e Strahilevitz (2021), por exemplo, investigaram os efeitos jurídicos e psicológicos dos *dark patterns*,

propondo distinções entre padrões leves e severos com base em sua eficácia manipulativa. Narayanan et al. (2020) discutem essas práticas como formas de arquitetura de escolha que violam princípios de design ético, aproximando o debate das discussões sobre nudges e paternalismo libertário.

Além da produção acadêmica, instituições como a *Federal Trade Commission (FTC)*, o *European Data Protection Board (EDPB)* e o *Center for Humane Technology* têm publicado relatórios e diretrizes que reconhecem os *dark patterns* como ameaças à privacidade, à transparência e à autodeterminação informacional. Esses documentos têm contribuído para consolidar o conceito em contextos regulatórios e políticos, ampliando sua relevância para além do campo do design.

A evolução conceitual dos *dark patterns* revela, portanto, um deslocamento de abordagens descritivas para modelos analíticos e normativos, que reconhecem o papel dessas práticas na configuração de experiências digitais e na limitação da autonomia dos usuários. Essa trajetória teórica sustenta a necessidade de revisões integrativas como a presente, capazes de articular múltiplas dimensões do fenômeno e contribuir para o avanço crítico do campo.

4 TIPOLOGIAS DE *DARK PATTERNS*

A consolidação teórica dos *dark patterns* permitiu o desenvolvimento de diversas tipologias que classificam essas práticas de acordo com seus objetivos, mecanismos de ação e impacto sobre o comportamento dos usuários. A categorização é fundamental para compreender a diversidade e sofisticação dos padrões manipulativos presentes em interfaces digitais, bem como para subsidiar ações regulatórias e éticas no campo do design.

Uma das primeiras classificações foi proposta por Harry Brignull, que identificou padrões como *bait and switch*, *roach motel*, *privacy zuckering*, *forced continuity* e *hidden costs*. Esses exemplos ilustram estratégias que dificultam o cancelamento de serviços, induzem à aceitação de termos sem leitura ou ocultam informações relevantes durante o processo de compra. Embora empírica, essa tipologia teve grande impacto na popularização do conceito e na mobilização da comunidade de design.

Posteriormente, Gray et al. (2018) propuseram uma taxonomia ética que agrupa os *dark patterns* em quatro categorias principais: obstrução, indução, dissimulação e coerção. A obstrução refere-se a práticas que dificultam ou atrasam ações desejadas pelo usuário, como cancelar uma assinatura ou excluir uma conta. A indução envolve a apresentação de informações de forma enviesada, levando o usuário a tomar decisões não intencionais. A dissimulação ocorre quando elementos da interface ocultam ou disfarçam opções relevantes, enquanto a coerção se manifesta por meio de pressões psicológicas ou sociais, como o uso de linguagem culpabilizante para induzir escolhas.

Outros estudos ampliaram essa taxonomia. Mathur et al. (2019) identificaram padrões como *sneak into basket*, em que produtos são adicionados automaticamente ao carrinho de compras; *forced enrollment*,

que obriga o usuário a se registrar para acessar conteúdos; e *hidden costs*, que revelam taxas adicionais apenas no momento final da transação. Essas práticas são comuns em plataformas de comércio eletrônico e têm impacto direto na conversão comercial e na percepção de confiança do usuário.

Luguri e Strahilevitz (2021), por sua vez, propuseram uma distinção entre *dark patterns* leves e severos, com base em sua capacidade de manipular decisões e violar o consentimento informado. Essa abordagem permite avaliar o grau de risco ético associado a cada padrão, contribuindo para a construção de diretrizes regulatórias mais precisas.

A diversidade de tipologias evidencia que os *dark patterns* formam um espectro de estratégias manipulativas, variando em intensidade, contexto de aplicação e impacto sobre a autonomia do usuário. A sistematização dessas categorias é essencial para o avanço teórico e para o enfrentamento normativo do problema, especialmente em ambientes digitais de alta complexidade e escala.

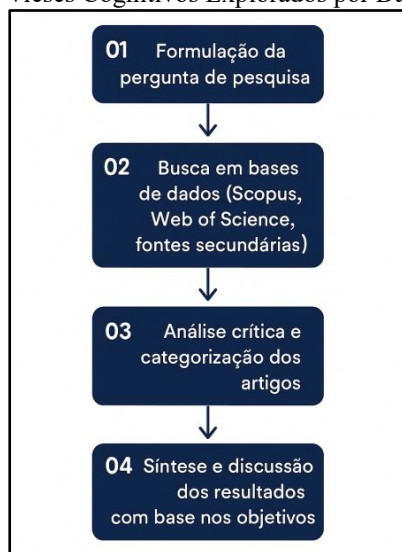
5 IMPACTOS COMPORTAMENTAIS DOS *DARK PATTERNS*

Os *dark patterns* operam sobre mecanismos cognitivos e emocionais profundamente enraizados na tomada de decisão humana. Ao explorar vieses mentais, limitações atencionais e heurísticas automáticas, essas práticas de design conseguem influenciar comportamentos de forma sutil, porém eficaz. A literatura científica tem demonstrado que os impactos vão além da frustração momentânea, afetando a autonomia, a confiança e o bem-estar digital dos usuários.

Diversos estudos empíricos indicam que os *dark patterns* reduzem a capacidade de escolha consciente, promovem decisões impulsivas e dificultam o exercício do consentimento informado. Mathur et al. (2019), por exemplo, demonstraram que padrões como *forced enrollment* e *hidden costs* aumentam significativamente as taxas de conversão comercial, mesmo quando os usuários não desejam prosseguir com a ação. Essa eficácia está diretamente relacionada à exploração de vieses como a aversão à perda, o viés do *status quo* e o efeito de enquadramento.

Para ilustrar os principais mecanismos cognitivos explorados por essas estratégias, a Figura 2 apresenta um diagrama simplificado com os vieses mais recorrentes identificados na literatura.

Figura 2 – Vieses Cognitivos Explorados por Dark Patterns.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A imagem evidencia quatro vieses centrais:

- Aversão à perda: induz o usuário a agir por medo de perder benefícios, mesmo que irrelevantes.
- Viés do *status quo*: favorece a manutenção de escolhas anteriores, dificultando mudanças ou cancelamentos.
- Urgência artificial: cria sensação de escassez temporal para pressionar decisões rápidas e não refletidas.
- Culpa induzida (*confirmshaming*): utiliza linguagem emocional para constranger o usuário que tenta recusar uma oferta.

Esses vieses são ativados por elementos visuais e textuais cuidadosamente projetados, como botões com frases culpabilizantes, contadores regressivos ou ocultação de opções alternativas. O impacto comportamental dessas práticas compromete a autodeterminação informacional e viola princípios fundamentais de transparência e respeito ao usuário.

Além dos efeitos individuais, os *dark patterns* afetam a relação dos usuários com as plataformas digitais. A repetição dessas estratégias gera desconfiança, sensação de vigilância constante e percepção de exploração comercial. Estudos conduzidos por Luguri e Strahilevitz (2021) indicam que padrões mais severos, como coerção emocional e obstrução deliberada, provocam reações negativas duradouras, incluindo abandono da plataforma, reclamações públicas e busca por alternativas mais éticas.

Assim, os *dark patterns* devem ser compreendidos como arquiteturas de influência que operam sobre estruturas cognitivas profundas, indo além de falhas de design ou estratégias comerciais agressivas. Seu impacto é sistemático e exige atenção crítica por parte de pesquisadores, designers e reguladores.

6 IMPLICAÇÕES ÉTICAS E LEGAIS DOS *DARK PATTERNS*

As práticas de design manipulativo conhecidas como *dark patterns* levantam questões éticas profundas e têm sido objeto de crescente atenção por parte de pesquisadores, juristas e órgãos reguladores. Ao interferirem na autonomia decisória dos usuários, essas estratégias violam princípios fundamentais como transparência, consentimento informado, equidade e respeito à privacidade. A discussão ética sobre os *dark patterns* está diretamente relacionada à responsabilidade dos designers e das plataformas digitais, que devem considerar não apenas a eficácia funcional das interfaces, mas também os impactos sociais e psicológicos de suas escolhas projetuais.

Do ponto de vista ético, autores como Don Norman e Tristan Harris defendem uma abordagem centrada no usuário, que promova experiências digitais respeitadas, claras e não coercitivas. O uso de *dark patterns* compromete essa perspectiva ao explorar vulnerabilidades cognitivas e emocionais para fins comerciais, muitas vezes sem que o usuário perceba a manipulação envolvida. A ética do design, nesse contexto, exige que profissionais atuem com responsabilidade social e compromisso com a justiça informacional.

No campo jurídico, diversas legislações internacionais têm avançado no reconhecimento e na proibição de *dark patterns*. O Regulamento Geral de Proteção de Dados da União Europeia (GDPR), por exemplo, estabelece que o consentimento deve ser livre, informado e inequívoco, o que exclui práticas que induzem ou pressionam o usuário. O Digital Markets Act (DMA), também da União Europeia, inclui cláusulas específicas contra padrões manipulativos em plataformas dominantes. No Brasil, a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD) prevê princípios como boa-fé, finalidade e necessidade, que são incompatíveis com estratégias de design enganosas. Nos Estados Unidos, a *Federal Trade Commission* (FTC) tem publicado relatórios e aplicado sanções contra empresas que utilizam *dark patterns*, reconhecendo essas práticas como formas de engano comercial.

A Tabela 1 retrata os principais marcos regulatórios que abordam os *dark patterns*, destacando seus princípios orientadores, dispositivos legais e abordagens normativas. Essa sistematização permite visualizar como diferentes jurisdições têm enfrentado o problema e quais fundamentos éticos e jurídicos sustentam suas ações.

Tabela 1 - Marcos regulatórios internacionais sobre *Dark Patterns* em interfaces digitais

Legislação / Instituição	Local / Jurisdição	Princípios relevantes	Abordagem sobre <i>Dark Patterns</i>
GDPR (Regulamento Europeu)	União Europeia	Consentimento livre e informado; transparência	Proíbe consentimento obtido por manipulação ou ambiguidade
DMA (Digital Markets Act)	União Europeia	Concorrência justa; proteção do consumidor	Veda práticas manipulativas em plataformas dominantes
LGPD (Lei Geral de Proteção de Dados)	Brasil	Boa-fé; finalidade; necessidade	Implica responsabilização por design que viole direitos do titular
FTC (Federal Trade Commission)	Estados Unidos	Engano comercial; proteção do consumidor	Publica diretrizes e aplica sanções contra padrões manipulativos

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025) ¹

Embora representem avanços significativos, os dispositivos legais que reconhecem os *dark patterns* como violação de direitos digitais ainda enfrentam limitações conceituais e operacionais que comprometem sua efetividade. A ausência de definições consensuais e de mecanismos técnicos para detectar essas práticas dificulta sua fiscalização e responsabilização. Além disso, muitas legislações ainda não contemplam a complexidade dos dark patterns em ambientes de inteligência artificial, personalização algorítmica e interfaces adaptativas.

Do ponto de vista normativo, é necessário construir diretrizes éticas e regulatórias que articulem princípios de design centrado no usuário, proteção de dados e justiça informacional. A colaboração entre pesquisadores, juristas, designers e órgãos reguladores é essencial para enfrentar os desafios impostos por práticas de design manipulativo em escala global.

7 DISCUSSÃO CRÍTICA E PERSPECTIVAS TEÓRICAS

A análise realizada neste estudo permite compreender os dark patterns como um fenômeno complexo que envolve múltiplas dimensões: técnica, cognitiva, ética e jurídica. Diferentemente de falhas de usabilidade, os dark patterns são construídos intencionalmente para explorar vulnerabilidades humanas, utilizando elementos visuais e textuais para induzir comportamentos que favorecem interesses comerciais, muitas vezes em detrimento da autonomia do usuário.

Do ponto de vista técnico, os padrões manipulativos são implementados por meio de microinterações, fluxos de navegação e escolhas de layout que dificultam ações desejadas (como cancelar uma assinatura) ou induzem decisões não refletidas (como aceitar termos sem leitura). Estudos como os de

¹ Com base em GDPR (art. 4 e 7), DMA(art.13), LGPD(art. 6), FTC Reports(2022-2025)

Mathur et al. (2019) demonstram que essas práticas estão presentes em larga escala, especialmente em plataformas de comércio eletrônico, onde a conversão é priorizada em detrimento da transparência.

Sob a ótica cognitiva, os dark patterns operam sobre vieses mentais como aversão à perda, viés do status quo e urgência artificial. Esses mecanismos são amplamente estudados pela psicologia comportamental e pela economia da atenção, revelando que decisões digitais são frequentemente tomadas em contextos de baixa reflexão e alta carga informacional. Kahneman (2011) e Sharot (2017) explicam como esses atalhos mentais são ativados por estímulos visuais e linguísticos, tornando o usuário suscetível à manipulação.

No campo ético, o debate gira em torno da responsabilidade dos designers e das plataformas digitais. A ética do design propõe que interfaces devem respeitar a autonomia, a privacidade e o consentimento informado dos usuários. Autores como Don Norman e Tristan Harris defendem uma abordagem centrada no ser humano, que valorize a clareza, a escolha consciente e a justiça informacional. O uso de padrões manipulativos, portanto, representa uma violação desses princípios, exigindo revisão crítica das práticas de mercado.

Do ponto de vista jurídico, há avanços significativos em legislações como o GDPR (União Europeia), a LGPD (Brasil) e o DMA (Digital Markets Act), que reconhecem os dark patterns como práticas abusivas. No entanto, a efetividade dessas normas depende da capacidade de fiscalização, da clareza conceitual e da atualização constante frente às inovações tecnológicas. A ausência de mecanismos automatizados para detecção e classificação de padrões manipulativos limita a atuação dos órgãos reguladores, exigindo investimentos em tecnologias de monitoramento e auditoria algorítmica.

Além disso, observa-se uma lacuna na formação profissional de designers e desenvolvedores quanto à ética digital. A inclusão de conteúdos sobre responsabilidade social, transparência e proteção de dados nos currículos acadêmicos pode contribuir para uma cultura de design mais consciente e comprometida com os direitos dos usuários.

Por fim, destaca-se a importância de abordagens interdisciplinares para enfrentar os desafios impostos pelos dark patterns. A articulação entre áreas como design, psicologia, direito e ciência da informação é essencial para construir diretrizes adaptativas, promover práticas responsáveis e garantir ambientes digitais mais justos e transparentes. A compreensão crítica dessas práticas não apenas fortalece o campo acadêmico, mas também oferece subsídios concretos para a formulação de políticas públicas e para a atuação ética no mercado digital.

8 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo realizou uma revisão integrativa e crítica sobre os dark patterns em interfaces digitais, abordando suas definições, tipologias, impactos comportamentais e implicações ético-legais. A análise permitiu compreender que essas práticas não se limitam a escolhas estéticas ou funcionais de design, mas constituem estratégias deliberadas de manipulação que exploram vulnerabilidades cognitivas e emocionais dos usuários. Ao interferirem na autonomia decisória, na privacidade e na experiência digital, os dark patterns configuram um problema multidimensional que exige atenção acadêmica, profissional e regulatória.

A sistematização das tipologias revelou a diversidade e sofisticação dos padrões manipulativos, que vão desde obstruções operacionais até coerções emocionais. Estudos empíricos demonstram que essas práticas estão amplamente disseminadas em plataformas digitais, especialmente em ambientes voltados à conversão comercial, como e-commerces e serviços de assinatura. O impacto sobre os usuários é significativo, afetando não apenas decisões pontuais, mas também a confiança nas tecnologias, o bem-estar digital e a percepção de controle sobre os próprios dados.

Do ponto de vista ético, os dark patterns desafiam os princípios fundamentais do design centrado no usuário, como transparência, consentimento informado e respeito à autodeterminação informacional. A literatura aponta para a necessidade de uma ética do design mais robusta, que considere os efeitos psicológicos e sociais das interfaces digitais. A formação profissional em áreas como UX, UI e desenvolvimento de sistemas deve incorporar conteúdos sobre responsabilidade social, justiça informacional e proteção de direitos digitais.

No campo jurídico, observa-se um avanço normativo importante, com legislações como o GDPR, LGPD e DMA reconhecendo explicitamente os dark patterns como práticas abusivas. No entanto, persistem desafios relacionados à fiscalização, à clareza conceitual e à adaptação das normas frente à evolução tecnológica. A ausência de mecanismos automatizados para detecção e classificação dessas práticas limita a atuação dos órgãos reguladores, exigindo investimentos em tecnologias de monitoramento, auditoria algorítmica e inteligência regulatória.

A contribuição deste estudo reside na articulação crítica entre diferentes dimensões do fenômeno, oferecendo uma base teórica e analítica para pesquisadores, profissionais de design, educadores digitais e formuladores de políticas públicas. Ao sistematizar o conhecimento existente e identificar lacunas relevantes, o artigo promove o avanço do campo e reforça a urgência de práticas de design mais éticas, transparentes e centradas no usuário.

8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas lacunas teóricas e nos desafios práticos identificados, propõem-se as seguintes direções para pesquisas futuras:

1. **Estudos empíricos com usuários reais**, utilizando métodos experimentais e observacionais para avaliar os efeitos psicológicos, emocionais e comportamentais dos dark patterns em diferentes contextos digitais.
2. **Desenvolvimento de frameworks éticos para UX design**, com validação interdisciplinar, que orientem profissionais na criação de interfaces respeitosas, transparentes e alinhadas aos direitos digitais dos usuários.
3. **Análise comparativa da eficácia regulatória**, investigando como diferentes países e blocos econômicos enfrentam os dark patterns, considerando aspectos culturais, jurídicos e tecnológicos.
4. **Aplicação de inteligência artificial para detecção automatizada de padrões manipulativos**, com foco em algoritmos de auditoria, classificação semântica e monitoramento em tempo real de interfaces digitais.
5. **Propostas de indicadores de transparência e autonomia**, que possam ser utilizados como métricas de avaliação ética em projetos de design digital, contribuindo para a certificação de plataformas e serviços.
6. **Estudos sobre formação profissional e ética digital**, avaliando currículos acadêmicos e práticas pedagógicas em cursos de design, tecnologia e comunicação, com foco na promoção de uma cultura de responsabilidade informacional.

Essas linhas de investigação podem contribuir significativamente para o fortalecimento da pesquisa sobre dark patterns, promovendo soluções mais eficazes, acessíveis e adaptadas aos desafios contemporâneos da sociedade digital.

Em um cenário digital cada vez mais complexo e orientado por dados, compreender e enfrentar os dark patterns torna-se uma tarefa urgente e coletiva. Este estudo buscou lançar luz sobre práticas de design que, embora muitas vezes invisíveis ao olhar leigo, exercem profundo impacto sobre a liberdade de escolha, a privacidade e a dignidade informacional dos usuários. Ao reunir evidências teóricas, empíricas e normativas, reafirma-se aqui a importância de um design ético, transparente e centrado no ser humano. Que este trabalho possa servir como base para reflexões críticas, ações regulatórias e inovações responsáveis que promovam uma cultura digital mais justa, inclusiva e consciente.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 15 ago. 2018.
- BRIGNULL, Harry. *Deceptive Design*. Disponível em: <https://www.deceptive.design/>. Acesso em: 28 out. 2025.
- EUROPEAN UNION. *Digital Markets Act (DMA)*. Regulation (EU) 2022/1925. *Official Journal of the European Union*, 2022.
- EUROPEAN UNION. *General Data Protection Regulation (GDPR)*. Regulation (EU) 2016/679. *Official Journal of the European Union*, 2016.
- GRAY, Colin M. et al. The dark (patterns) side of UX design. In: *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2018. p. 1–14.
- GRAY, Colin M.; CHAMORRO, Fernanda; OBI, Tolu; DUANE, Andrew. A systematic review of dark patterns research. In: *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2023. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/fullHtml/10.1145/3563703.3596635>. Acesso em: 20 out. 2025.
- GRAY, Colin M. et al. Toward an ontology of dark patterns. *arXiv preprint*, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2309.09640>. Acesso em: 14 out. 2025.
- HARRIS, Tristan. *Center for Humane Technology*. Disponível em: <https://www.humanetech.com>. Acesso em: 05 nov. 2025.
- KAHNEMAN, Daniel. *Thinking, Fast and Slow*. New York: Farrar, Straus and Giroux, 2011.
- LUGURI, Jamie; STRAHILEVITZ, Lior. Shining a light on dark patterns. *Journal of Legal Analysis*, v. 13, n. 1, p. 43–109, 2021.
- MATHUR, Arunesh et al. Dark patterns at scale: Findings from a crawl of 11K shopping websites. In: *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, v. 3, CSCW, p. 1–32, 2019.
- NARAYANAN, Arvind et al. Manipulation and dark patterns in online interfaces. Princeton University: Center for Information Technology Policy, 2020.
- SHAROT, Tali. *The Influential Mind: What the Brain Reveals About Our Power to Change Others*. New York: Henry Holt and Company, 2017.
- UNITED STATES. Federal Trade Commission (FTC). *Bringing Dark Patterns to Light*. Washington, DC: FTC, 2022. Disponível em: <https://www.ftc.gov>. Acesso em: 20 out. 2025.

**APLICAÇÃO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA NA EDUCAÇÃO 5.0:
PERSONALIZAÇÃO DA APRENDIZAGEM E DESENVOLVIMENTO SOCIOEMOCIONAL
EM AMBIENTE ESCOLAR**

**APPLICATION OF GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN EDUCATION 5.0:
PERSONALIZATION OF LEARNING AND SOCIOEMOTIONAL DEVELOPMENT IN THE
SCHOOL ENVIRONMENT**

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-007>

Natan André de Jesus

Especialista em Educação Inclusiva e Especial
Centro Universitário Faveni (Unifaveni)
E-mail: natan.jesus@sed.sc.gov.br

Jeferson Vitorino dos Santos

Especialista em Metodologia do Ensino em Ciências Biológicas
Centro Universitário Leonardo da Vinci (UNIASSELVI)
E-mail: vitorinojeferson@hotmail.com

RESUMO

O estudo analisa o impacto da inteligência artificial generativa (IAG) na Educação 5.0, destacando seu papel na personalização da aprendizagem e no desenvolvimento socioemocional de estudantes. Caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, de natureza bibliográfica e exploratória, fundamentada em produções acadêmicas recentes publicadas entre 2023 e 2025. Os resultados indicam que a IAG possibilita ambientes educacionais mais personalizados, dinâmicos e inclusivos, favorecendo tanto o desempenho cognitivo quanto o emocional dos alunos. Contudo, a pesquisa também evidencia desafios éticos e pedagógicos relacionados à formação docente e ao uso responsável da tecnologia. Conclui-se que a integração consciente e crítica entre inovação digital e valores humanos é essencial para consolidar a Educação 5.0 como um modelo que une tecnologia, ética e humanização.

Palavras-chave: Inteligência Artificial; Educação 5.0; Personalização da aprendizagem; Competências socioemocionais; Inovação educacional.

ABSTRACT

The study analyzes the impact of generative artificial intelligence (GAI) on Education 5.0, highlighting its role in personalizing learning and developing students' socioemotional skills. It is a qualitative, bibliographic, and exploratory research based on academic works published between 2023 and 2025. The results indicate that GAI enables more personalized, dynamic, and inclusive educational environments, fostering both cognitive and emotional performance. However, the study also highlights ethical and pedagogical challenges related to teacher training and responsible technology use. It concludes that the conscious and critical integration between digital innovation and human values is essential to consolidate Education 5.0 as a model that unites technology, ethics, and humanization.

Keywords: Artificial Intelligence; Education 5.0; Personalized learning; Socioemotional skills; Educational innovation.

1 INTRODUÇÃO

A revolução tecnológica tem impactado profundamente diversos setores, e a educação não é exceção. A Educação 5.0 surge como um conceito inovador que vai além da mera digitalização do ensino, integrando tecnologias avançadas, como a inteligência artificial generativa, com valores humanos essenciais para formar cidadãos completos. Este novo paradigma educativo visa um aprendizado mais personalizado, inclusivo e humanizado, acoplado ao desenvolvimento das competências socioemocionais, que são cada vez mais valorizadas no mundo contemporâneo.

Neste contexto, a inteligência artificial generativa (IAG) demonstra um potencial significativo para revolucionar a forma como o conhecimento é transmitido e construído. Suas aplicações permitem o desenvolvimento de ambientes escolares nos quais as necessidades individuais dos alunos são atendidas com maior precisão e agilidade, enquanto promove o crescimento emocional e social desses aprendizes. Este artigo explora como a implementação da IAG pode transformar o ambiente educacional, promovendo resultados pedagógicos e socioemocionais positivos.

A especificidade deste estudo reside na análise do impacto da IAG tanto na personalização do ensino quanto no desenvolvimento de habilidades socioemocionais fundamentais para o sucesso acadêmico e pessoal dos estudantes, em horizonte situado no ano de 2025.

Nesse cenário, a Educação 5.0 surge como uma resposta às demandas de uma sociedade hiperconectada e em constante transformação, na qual a tecnologia deve atuar como aliada do desenvolvimento humano. Essa abordagem propõe a integração entre inovação digital e valores éticos, sociais e emocionais, reconhecendo que o aprendizado vai além da aquisição de conteúdos. Assim, a inteligência artificial generativa, quando aplicada de forma consciente e pedagógica, pode promover uma educação mais inclusiva, criativa e centrada no aluno, reforçando o papel da escola como espaço de formação integral e cidadã.

2 METODOLOGIA

O estudo caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, de caráter bibliográfico e exploratório. Foram analisadas produções acadêmicas recentes publicadas entre 2023 e 2025, relacionadas à aplicação da inteligência artificial generativa (IAG) na Educação 5.0.

A seguir, apresentam-se as etapas metodológicas que fundamentaram o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 TIPO DE PESQUISA

A pesquisa é de natureza **qualitativa**, pois busca compreender fenômenos de forma interpretativa, considerando o contexto e as percepções dos autores analisados. Possui caráter **bibliográfico**, uma vez que



se baseia na leitura, seleção e análise de obras científicas, e **exploratório**, por investigar um tema recente e em constante evolução — a aplicação da inteligência artificial generativa na Educação 5.0.

2.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram consultadas bases de dados nacionais e internacionais, incluindo artigos científicos, relatórios institucionais e documentos oficiais publicados entre 2023 e 2025. A seleção dos materiais considerou a relevância teórica e a atualidade das discussões sobre inteligência artificial, educação digital e competências socioemocionais.

As informações coletadas foram analisadas de forma descritiva e interpretativa, buscando identificar relações entre a IAG e os processos de personalização da aprendizagem e desenvolvimento emocional.

2.3 REFERENCIAIS TEÓRICOS

A fundamentação teórica apoia-se em autores e instituições que discutem a integração entre tecnologia e educação, como Silva, Pereira e Almeida (2025), Gonçalves e Moura (2025), Santos (2025) e documentos oficiais da UNESCO (2025) e do Ministério da Educação (2024). Esses referenciais forneceram o embasamento necessário para compreender os aspectos éticos, pedagógicos e sociais da Educação 5.0.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A adoção da inteligência artificial generativa (IAG) na educação vem crescendo significativamente, especialmente a partir de 2023. Dados recentes indicam que sete em cada dez alunos do ensino médio brasileiro já utilizam ferramentas desse tipo para pesquisas escolares. Entretanto, apenas 32% desses estudantes relatam ter recebido orientações adequadas por parte das escolas, o que revela uma lacuna importante na formação e mediação pedagógica.

Essa ampla adoção da IAG traz benefícios claros, como a personalização da aprendizagem e o acesso facilitado a informações diversas. Por meio dela, os estudantes podem obter explicações adaptadas ao seu nível de compreensão e feedbacks imediatos. Contudo, a ausência de orientação crítica aumenta o risco de uso inadequado e plágio, evidenciando a necessidade de políticas de educação digital.

Além dos aspectos cognitivos, observa-se que a IAG pode auxiliar no desenvolvimento das competências socioemocionais. Simulações baseadas em IA podem estimular empatia, controle emocional e resolução de conflitos, criando ambientes que favorecem o desenvolvimento integral do aluno.

Outro destaque é o papel da IAG na inclusão educacional. Tecnologias adaptativas permitem personalizar recursos e atividades, favorecendo estudantes com necessidades especiais. Essa característica reforça o potencial inclusivo da Educação 5.0.

Todavia, os desafios persistem. A resistência docente, a falta de infraestrutura e as questões éticas sobre privacidade e transparência dos algoritmos exigem atenção. A formação continuada dos professores é essencial para garantir uma integração crítica e responsável da IA no ensino.

4 CONCLUSÃO

A inteligência artificial generativa apresenta-se como uma ferramenta transformadora para a educação contemporânea, podendo promover avanços substanciais na personalização da aprendizagem e no desenvolvimento das competências socioemocionais dos estudantes. Seu uso possibilita ambientes educacionais mais dinâmicos, ajustados às necessidades individuais e preparatórios para os desafios do século XXI.

Entretanto, a implementação efetiva e ética dessa tecnologia requer esforços coordenados entre educadores, gestores, desenvolvedores e legisladores. A formação continuada dos professores, o desenvolvimento de políticas claras de uso e proteção, e a valorização do papel humano na mediação são fundamentais para garantir que a IAG seja um instrumento de inclusão e qualidade no ensino.

O futuro da educação passa pela integração consciente e crítica entre tecnologia e valores humanos, consolidando a Educação 5.0 como um modelo que alia inovação digital à promoção do bem-estar e da cidadania plena. Pesquisas futuras deverão continuar investigando os impactos dessa integração, bem como as melhores práticas para superar os desafios técnicos, pedagógicos e éticos que ainda persistem.

Assim, a inteligência artificial generativa não apenas amplia as possibilidades de ensino e aprendizagem, mas também inspira uma reflexão necessária sobre o papel da educação na formação de indivíduos preparados para um mundo em constante transformação.

A inserção da inteligência artificial generativa no cenário educacional brasileiro representa um passo significativo rumo à modernização e humanização do ensino. Ao oferecer soluções tecnológicas que personalizam a experiência educativa e promovem o desenvolvimento socioemocional, a IAG contribui para que a educação atenda às demandas de um século marcado pela complexidade e transformação contínua.

No entanto, o sucesso dessa integração depende do equilíbrio entre inovação e cuidado com os aspectos humanos e éticos do processo educativo. A formação dos profissionais da educação para o uso crítico e criativo dessas ferramentas, o fortalecimento das políticas públicas em educação digital e a garantia de acessibilidade em todas as escolas são condições indispensáveis.

Embora os resultados teóricos e empíricos apontem para grandes potencialidades da IAG, ainda são necessárias investigações futuras que analisem sua implementação prática em diferentes realidades escolares, especialmente quanto à formação docente e às desigualdades de acesso às tecnologias.



Dessa forma, a educação que se constrói com o suporte da inteligência artificial generativa tem potencial para não apenas elevar os níveis de aprendizagem, mas também para formar cidadãos críticos, criativos e emocionalmente preparados para os desafios do mundo contemporâneo. A Educação 5.0, portanto, surge como uma proposta que alia ciência e sensibilidade, tecnologia e humanidade, conhecimento e empatia.

Futuros estudos e práticas devem ampliar a investigação sobre os impactos de longo prazo da IA generativa na educação, assegurando que o uso dessa tecnologia se dê em consonância com os valores democráticos, inclusivos e éticos que sustentam uma educação de qualidade para todos.

REFERÊNCIAS

CETIC.BR. *Sete em cada dez alunos do Ensino Médio usam IA generativa em pesquisas escolares*. São Paulo, 2025. Disponível em: <<https://www.cetic.br>>. Acesso em: 26 out. 2025.

GONÇALVES, L.; MOURA, F. *Desafios e Perspectivas do Uso da Inteligência Artificial na Avaliação Educacional*. Revista de Avaliação Educacional, v. 12, n. 3, p. 75-90, 2025.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. *Políticas públicas para a incorporação de tecnologias digitais na educação brasileira*. Brasília, 2024.

OPENAI. *ChatGPT: modelo de linguagem generativa*. Disponível em: <<https://openai.com/chatgpt>>. Acesso em: 26 out. 2025.

SANTOS, A. *Ética e Inteligência Artificial na Educação: um estudo crítico*. Revista de Tecnologia e Sociedade, v. 8, n. 1, p. 112-130, 2025.

SILVA, J.; PEREIRA, M.; ALMEIDA, R. *Inteligência Artificial Generativa e Personalização da Aprendizagem*. Revista Brasileira de Educação Digital, v. 5, n. 2, p. 45-60, 2025.

UNESCO. *Inteligência Artificial na Educação: desafios e oportunidades*. Disponível em: <<https://www.unesco.org>>. Acesso em: 26 out. 2025.

**COMPETÊNCIAS SOCIOEMOCIONAIS COMO PROMOTORAS DE BEM-ESTAR
PSICOLÓGICO NO AMBIENTE ESCOLAR****SOCIO-EMOTIONAL SKILLS AS PROMOTERS OF PSYCHOLOGICAL WELL-BEING IN
THE SCHOOL ENVIRONMENT** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-008>**Rose Cristina Veiga**

Mestranda em Ciências da Saúde
Ivy Enber Christian University
E-mail: rosecveiga@gmail.com

Andressa Santana Batista

Doutoranda em Geografia
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
E-mail: andressabatista.geo@gmail.com

Edna Margarita Pardo Prieto

Mestra em Neurociência e Biologia Comportamental
Universidad Pablo de Olávide
E-mail: margaritapardop@gmail.com

Elisabete dos Santos Silva

Mestra em Políticas Culturais e Educacionais
Instituto de Educação Kirei Saso
E-mail: lisasansilva@gmail.com

Giseli Aparecida Borsati Colombo

Mestranda em Educação
Universidade Europeia do Atlântico
E-mail: colombogiseli@gmail.com

Eliomar de Jesus Santos

Mestrando em Ciências da Educação
Ivy Enber Christian University
E-mail: eliomardejesus75@gmail.com

Isaque Pinho dos Santos

Especialista em Ensino de Ciências e Matemática
Instituto Federal do Maranhão
E-mail: prof.isaque@hotmail.com

Carlos Malan de Souza Fonseca Júnior

Licenciado em Letras com Habilitação em Línguas Portuguesa e Inglesa
Universidade de Pernambuco
E-mail: carlosmalanfonseca@gmail.com

Liliana Cecilia Pardo Prieto

Graduanda em Filosofia
Fundación Universitaria Católica del Norte
E-mail: lilipardop@gmail.com

Juan David Álvarez Muñoz

Graduando em Filosofia
Fundación Universitaria Católica del Norte
E-mail: mr.juanalvarez@gmail.com

RESUMO

O presente artigo tem como finalidade analisar o papel das competências socioemocionais como promotoras do bem-estar psicológico no ambiente escolar, uma temática que ganhou destaque nas últimas décadas diante do aumento de demandas emocionais e relacionais entre estudantes. A pesquisa foi motivada pela constatação de que, embora a relevância das competências socioemocionais seja amplamente reconhecida, ainda persiste uma lacuna significativa quanto à compreensão de como essas habilidades podem ser efetivamente integradas às práticas escolares com vistas à promoção da saúde mental. Nesse contexto, o estudo buscou responder ao problema central: de que maneira as competências socioemocionais contribuem para o bem-estar psicológico dos alunos e quais desafios permeiam sua implementação no cotidiano escolar. O objetivo geral do trabalho consistiu em examinar, por meio de uma revisão de literatura, evidências teóricas e empíricas que relacionam o desenvolvimento socioemocional à melhoria do bem-estar psicológico no contexto educacional. Para isso, adotou-se uma metodologia de revisão qualitativa e exploratória, na qual foram selecionados 13 artigos publicados entre 2019 e 2025, em língua portuguesa, disponíveis em bases como Google Acadêmico e SciELO. Os critérios de inclusão contemplaram pertinência temática, rigor metodológico e alinhamento com os conceitos de competências socioemocionais e bem-estar psicológico. Os dados foram analisados por meio de análise temática, que permitiu organizar os achados em categorias coerentes com os eixos do estudo. Os resultados apontaram que competências como autorregulação emocional, empatia, autocontrole, cooperação e tomada de decisão responsável exercem impacto significativo no equilíbrio emocional dos estudantes e nas relações interpessoais no ambiente escolar. Também foi possível identificar que a ausência de um trabalho sistemático dessas habilidades pode contribuir para o aumento de conflitos, dificuldades emocionais e prejuízos no desempenho acadêmico. Além disso, destacou-se a importância da formação docente, da qualidade do clima escolar e da adoção de políticas educacionais consistentes para a efetiva integração das competências socioemocionais. Conclui-se que o desenvolvimento socioemocional é um componente essencial para a promoção do bem-estar psicológico no ambiente escolar, oferecendo benefícios individuais e coletivos. O estudo contribui ao reunir evidências recentes que reforçam a necessidade de práticas educativas intencionais e alinhadas à formação integral dos estudantes, bem como ao indicar caminhos para futuras pesquisas e intervenções.

Palavras-chave: Competências Socioemocionais; Bem-estar Psicológico; Ambiente Escolar; Educação Emocional.

ABSTRACT

This article aims to analyze the role of socio-emotional skills as promoters of psychological well-being in the school environment, a topic that has gained prominence in recent decades due to the increase in emotional and relational demands among students. The research was motivated by the observation that, although the relevance of socio-emotional skills is widely recognized, a significant gap persists in understanding how these skills can be effectively integrated into school practices to promote mental health. In this context, the study sought to answer the central question: how do socio-emotional skills contribute to the psychological well-being of students and what challenges permeate their implementation in daily school

life? The overall objective of the work was to examine, through a literature review, theoretical and empirical evidence that relates socio-emotional development to the improvement of psychological well-being in the educational context. To this end, a qualitative and exploratory review methodology was adopted, in which 13 articles published between 2019 and 2025, in Portuguese, available in databases such as Google Scholar and SciELO, were selected. The inclusion criteria considered thematic relevance, methodological rigor, and alignment with the concepts of socio-emotional competencies and psychological well-being. The data were analyzed through thematic analysis, which allowed the findings to be organized into categories consistent with the study's axes. The results indicated that competencies such as emotional self-regulation, empathy, self-control, cooperation, and responsible decision-making have a significant impact on students' emotional balance and interpersonal relationships in the school environment. It was also possible to identify that the absence of systematic work on these skills can contribute to increased conflicts, emotional difficulties, and impairments in academic performance. Furthermore, the importance of teacher training, the quality of the school climate, and the adoption of consistent educational policies for the effective integration of socio-emotional competencies was highlighted. It is concluded that socio-emotional development is an essential component for promoting psychological well-being in the school environment, offering individual and collective benefits. The study contributes by bringing together recent evidence that reinforces the need for intentional educational practices aligned with the holistic development of students, as well as indicating avenues for future research and interventions.

Keywords: Socio-emotional Skills; Psychological Well-being; School Environment; Emotional Education.

1 INTRODUÇÃO

As competências socioemocionais têm se consolidado como um componente essencial no processo educativo contemporâneo, especialmente diante das transformações sociais, culturais e tecnológicas que caracterizam os tempos atuais. Em um contexto marcado por demandas crescentes de adaptação, autonomia e convivência, compreender como os aspectos emocionais e sociais contribuem para o desenvolvimento integral dos estudantes tornou-se uma necessidade urgente. Assim, investigar o papel dessas competências no ambiente escolar revela não apenas uma dimensão pedagógica, mas também humana, pautada na promoção do bem-estar psicológico e na formação de sujeitos capazes de lidar com os desafios cotidianos.

A relevância desse tema evidencia-se à medida que escolas de diferentes níveis de ensino têm observado o aumento de questões relacionadas à saúde emocional, à convivência e ao desempenho acadêmico. Pesquisas recentes apontam que o desenvolvimento socioemocional está diretamente relacionado a melhores indicadores de autoestima, resiliência, relacionamentos interpessoais e aprendizagem significativa. Portanto, discutir essas competências no âmbito escolar não se limita a uma tendência educativa, mas configura uma necessidade social e acadêmica que busca compreender como o bem-estar psicológico pode ser fortalecido no espaço escolar.

Entretanto, apesar do crescente interesse por essa temática, percebe-se uma lacuna significativa quanto à compreensão de como as competências socioemocionais podem ser efetivamente promovidas, avaliadas e integradas às práticas escolares. O problema central que orienta esta investigação reside justamente na necessidade de analisar, de forma crítica e fundamentada, as evidências disponíveis na literatura sobre a relação entre o desenvolvimento socioemocional e o bem-estar psicológico dos estudantes. Tal lacuna revela o desafio de articular teorias, políticas educacionais e práticas pedagógicas que respondam às demandas atuais da escola.

A escolha desse tema justifica-se pela urgência de ampliar a discussão sobre a formação integral no ambiente educacional, especialmente porque o contexto escolar tem sido impactado por fenômenos como ansiedade, dificuldades de regulação emocional e conflitos interpessoais. Compreender como as competências socioemocionais podem contribuir para mitigar essas questões torna-se fundamental para garantir não apenas o desenvolvimento cognitivo, mas também o equilíbrio emocional dos estudantes. Assim, aprofundar o debate sobre essa temática permite fortalecer práticas educativas mais sensíveis, inclusivas e alinhadas com as necessidades reais da comunidade escolar.

Diante desse cenário, o objetivo geral deste trabalho consiste em analisar, por meio de uma revisão de literatura, como as competências socioemocionais podem atuar como promotoras do bem-estar psicológico no ambiente escolar. Busca-se identificar os principais constructos teóricos, evidências empíricas e abordagens pedagógicas que sustentam essa relação, de modo a oferecer uma compreensão

ampla e crítica sobre o tema. Esse propósito orienta a estrutura do estudo, norteando a seleção e interpretação das produções científicas relevantes.

A importância científica desta investigação reside na possibilidade de sintetizar conhecimentos dispersos e contribuir para o fortalecimento do campo de estudos sobre educação socioemocional. Esta pesquisa pretende colaborar para o avanço teórico sobre o tema, permitindo que novas análises, práticas e políticas educacionais sejam fundamentadas em evidências consistentes. Tal contribuição é especialmente relevante em um momento histórico em que o desenvolvimento emocional e social assume centralidade nas discussões sobre qualidade educacional.

Destaca-se a relevância prática deste estudo, uma vez que os resultados obtidos podem subsidiar educadores, gestores, psicólogos e demais profissionais da educação no planejamento de ações voltadas ao bem-estar psicológico dos estudantes. A partir de uma compreensão mais aprofundada das competências socioemocionais, espera-se favorecer a construção de ambientes escolares mais acolhedores, participativos e emocionalmente saudáveis.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo caracteriza-se como uma revisão de literatura de caráter qualitativo, exploratório e descritivo, cujo propósito foi reunir, analisar e interpretar produções científicas relacionadas às competências socioemocionais e ao bem-estar psicológico no ambiente escolar. Para garantir o rigor metodológico, foram definidos critérios sistemáticos de busca, seleção e análise, permitindo a organização dos conteúdos teóricos de forma coerente com o problema e o objetivo da pesquisa. Essa abordagem possibilitou identificar avanços, desafios e lacunas existentes na literatura recente sobre o tema, fornecendo um panorama atualizado da discussão científica.

A seleção dos materiais seguiu critérios previamente estabelecidos, contemplando exclusivamente artigos publicados entre os anos de 2019 e 2025, em língua portuguesa e disponíveis integralmente em plataformas como Google Acadêmico e SciELO. No total, foram analisados 13 artigos que atendiam aos critérios de inclusão: pertinência temática, rigor metodológico e relação direta com competências socioemocionais ou bem-estar psicológico escolar. Foram excluídos materiais duplicados, textos não acadêmicos, produções sem revisão por pares e estudos que não apresentavam conexão explícita com o escopo investigativo. Esse processo assegurou a consistência e a relevância dos dados coletados.

A coleta de dados envolveu a identificação, leitura e sistematização dos artigos selecionados, considerando seus objetivos, metodologias, resultados e contribuições teóricas. A análise dos dados ocorreu por meio de análise temática, permitindo a organização dos conteúdos em categorias que refletiram os principais eixos da pesquisa. Durante todo o processo, foram observadas considerações éticas, como a preservação da integridade intelectual, a citação adequada dos autores e a utilização fidedigna das

informações. Reconhece-se, contudo, que o estudo apresenta limitações inerentes às revisões narrativas, como a impossibilidade de abarcar a totalidade da produção existente e a dependência da disponibilidade de materiais nas bases consultadas, fatores que podem influenciar a amplitude e a profundidade das conclusões apresentadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com Araujo e Oliveira (2022), competências socioemocionais no contexto escolar referem-se a um conjunto integrado de conhecimentos, habilidades e atitudes que permitem aos alunos identificar e regular suas próprias emoções, estabelecer objetivos, tomar decisões responsáveis e manter relacionamentos saudáveis. Essas competências vêm sendo cada vez mais discutidas nas políticas curriculares contemporâneas, especialmente com a incorporação na BNCC e em programas de educação socioemocional nas escolas brasileiras. Essa abrangência conceitual mostra que CSE não são apenas “habilidades extras”, mas parte central de uma educação integral, articulando fatores afetivos e sociais com os processos de aprendizagem.

Segundo Carvalho e Nunes (2024), a inteligência emocional é um componente central das competências socioemocionais, particularmente no ambiente educacional, pois envolve a consciência e a regulação das próprias emoções, bem como a compreensão dos sentimentos alheios. Essa capacidade é fundamental para que indivíduos, tanto alunos quanto educadores, gerenciem o estresse e construam relacionamentos interpessoais positivos no contexto da escola. Em uma revisão de escopo, os autores destacam que a promoção da inteligência emocional nas escolas pode favorecer o equilíbrio emocional dos estudantes, contribuindo para redução de ansiedade, estresse e outros fatores que comprometem o bem-estar psicológico. Dessa forma, investir em programas e práticas que desenvolvam a inteligência emocional no contexto escolar se apresenta como uma via estratégica para promover saúde mental e qualidade de vida dos alunos.

Conforme Nogueira e Silva (2024), a autorregulação emocional constitui-se como uma competência fundamental no desenvolvimento socioemocional de adolescentes, sendo especialmente relevante no contexto escolar, onde pressões sociais e acadêmicas exigem mecanismos de controle interno. No ensaio teórico dos autores, é discutido como a teoria social cognitiva se relaciona com a autorregulação, e como essa habilidade pode atuar como um fator protetor contra ansiedade acadêmica e estresse de provas. Eles argumentam que promover a autorregulação emocional nas escolas pode fortalecer o bem-estar psicológico dos jovens, melhorando tanto sua saúde mental quanto seu desempenho escolar.

De acordo com Heinen *et al.* (2022), o trabalho de regulação emocional durante a infância, quando incorporado ao contexto escolar, pode promover um aumento significativo nas habilidades sociais e de regulação emocional das crianças, ao mesmo tempo em que reduz sintomas de ansiedade, depressão e

problemas de comportamento. No estudo quasi-experimental realizado com crianças entre 7 e 9 anos, os autores observaram ganhos nas competências socioemocionais após a intervenção, sugerindo que práticas sistemáticas de regulação emocional devem fazer parte das estratégias preventivas e de promoção do bem-estar psicológico na escola.

De acordo com Ricci e Cruz (2021), o desenvolvimento de competências socioemocionais em alunos da educação básica pode funcionar como uma ferramenta eficaz para a prevenção e mitigação do bullying escolar, influenciando positivamente o clima da escola. Ao promoverem habilidades como a empatia e a resolução pacífica de conflitos, essas competências capacitam os estudantes a intervir e a se relacionar de forma mais respeitosa, reduzindo a incidência de agressões. Em sua revisão, os autores argumentam que programas educativos focados na empatia, autorregulação, autoestima e cooperação não apenas reduzem a violência interpessoal, mas também promovem um ambiente escolar mais seguro e acolhedor, o que favorece o bem-estar psicológico coletivo.

Conforme Justo e Andretta (2020), as competências socioemocionais dos professores, especialmente aquelas relacionadas à regulação emocional e habilidades sociais educativas, desempenham um papel crucial na dinâmica de sala de aula. O equilíbrio emocional e a capacidade do docente de gerir interações complexas criam um ambiente de aprendizado mais seguro, acolhedor e propício ao desenvolvimento pleno dos alunos. No estudo com docentes de 1º ao 6º ano, os autores identificaram que professores com maior clareza emocional e consciência de seus sentimentos expressam-se de maneira mais eficaz, especialmente em instruções, aprovações e correções, o que pode impactar positivamente as interações professor-aluno e favorecer o bem-estar emocional no ambiente escolar.

De acordo com Sena (2025), a inserção de competências socioemocionais nos currículos escolares brasileiros representa um desafio significativo para políticas educacionais contemporâneas, exigindo articulação entre currículos formais (como a BNCC), formação docente e práticas escolares. Para uma implementação efetiva, é necessário superar a mera previsão legal e garantir que os professores estejam preparados e que as práticas pedagógicas incorporem consistentemente essas habilidades. No artigo de revisão integrativa, o autor discute as perspectivas e obstáculos dessa implementação, incluindo a falta de capacitação, resistência institucional e dificuldade de mensuração, apontando para a necessidade de políticas consistentes e sustentadas para promover efetivamente o bem-estar psicológico por meio da educação socioemocional.

Segundo Mainardi (2021), competências socioemocionais têm uma estreita relação com a aprendizagem escolar, uma vez que habilidades como autorregulação, empatia e autoconsciência favorecem ambientes de ensino mais colaborativos e menos conflituosos. O aluno que consegue gerir suas emoções e entender o outro está mais apto a manter o foco, participar ativamente e construir conhecimento de maneira eficaz. Na revisão, a autora destaca que a prática dialógica, a escuta ativa e a cooperação entre professores,

alunos e famílias reforçam a conexão entre o desenvolvimento socioemocional e o rendimento acadêmico, contribuindo para uma educação mais integrada e significativa.

De acordo com Silva e Behar (2023), o mapeamento de competências socioemocionais em estudantes tem revelado uma diversidade conceitual expressiva, com cerca de 87 diferentes CSE identificadas em estudos recentes. Essa grande variedade de construtos e definições ressalta a complexidade do tema e a necessidade de maior clareza e padronização para a sua medição e aplicação no campo educacional. No artigo de revisão sistemática, os autores argumentam que essa pluralidade de constructos dificulta a padronização conceitual, mas também aponta para a riqueza e a complexidade do campo, evidenciando a necessidade de modelos integrados que possam servir como referência para programas educativos e avaliações de bem-estar psicológico.

Conforme Versuti et al. (2020), tecnologias educacionais podem desempenhar um papel significativo no desenvolvimento de competências socioemocionais, ao fornecerem ambientes interativos e recursos digitais que favoreçam a autorreflexão, a cooperação e a regulação emocional. Tais ferramentas, como jogos e simulações, oferecem maneiras inovadoras e envolventes de praticar e desenvolver habilidades sociais em um contexto seguro. Na revisão sistemática conduzida pelos autores, identificou-se que plataformas digitais, jogos educativos e atividades multimídia são utilizados em intervenções para fortalecer habilidades como empatia, autoconsciência e tomada de decisão responsável, contribuindo para o bem-estar psicológico dos alunos em contextos escolares contemporâneos.

De acordo com Cardoso *et al.* (2025), a teoria da psicologia positiva considera a resiliência uma competência socioemocional essencial para que estudantes enfrentem adversidades e mantenham seu bem-estar psicológico no ambiente escolar. Desenvolver a capacidade de se recuperar de desafios e manter o otimismo é crucial para o sucesso acadêmico e para a saúde mental dos alunos. Embora poucos estudos recentes brasileiros tratem diretamente da “resiliência escolar” como termo isolado, muitos dos programas de aprendizagem socioemocional incluem componentes como enfrentamento (coping), gratidão e regulação emocional, que são reconhecidos como fatores de proteção. Esse enfoque sugere que promover resiliência via competências socioemocionais pode fortalecer a capacidade dos alunos de lidar com estresse, conflito e mudanças, contribuindo para uma experiência escolar mais saudável e sustentável.

De acordo com Malta *et al.* (2024), uma das lacunas identificadas na literatura é a avaliação sistemática e robusta das competências socioemocionais nas escolas, especialmente no que se refere a instrumentos validados para diferentes faixas etárias. A falta de métodos de medição padronizados e confiáveis dificulta o monitoramento eficaz do desenvolvimento dessas habilidades e a comprovação do impacto das intervenções. Na revisão dos autores, destaca-se a necessidade de ferramentas que considerem o contexto cultural e escolar brasileiro, bem como processos periódicos de mensuração para verificar a efetividade de programas socioemocionais. Sem avaliação adequada, torna-se difícil mensurar o impacto

das intervenções no bem-estar psicológico dos estudantes, o que limita a sustentabilidade e escalabilidade dessas políticas.

Conforme Kobarg (2019), a formação do professor deve incluir a inteligência emocional e outras competências socioemocionais como parte integrada do desenvolvimento profissional, visto que os docentes são agentes centrais na promoção de um ambiente socioemocional saudável. Ao serem modelos de conduta e facilitadores de interações, os professores precisam estar bem equipados para lidar com suas próprias emoções e as de seus alunos. No artigo de revisão, a autora argumenta que professores com bem desenvolvidas competências socioemocionais são mais aptos a modelar comportamentos saudáveis para os alunos, responder com empatia a conflitos e regular suas próprias reações, o que favorece a criação de um clima escolar propício ao bem-estar psicológico coletivo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises realizadas ao longo deste estudo permitiram evidenciar que as competências socioemocionais exercem um papel central na promoção do bem-estar psicológico no ambiente escolar, confirmando o alcance do objetivo geral proposto. A revisão de literatura demonstrou que habilidades como autorregulação, empatia, autoconsciência e tomada de decisão responsável estão diretamente associadas a melhores indicadores emocionais, relacionais e acadêmicos entre estudantes de diferentes faixas etárias. Dessa forma, os resultados apresentados consolidam a compreensão de que o desenvolvimento socioemocional constitui um eixo estruturante para uma educação integral e humanizadora.

Em relação ao problema da pesquisa, os achados mostraram que a principal lacuna reside na implementação sistemática e consistente dessas competências no cotidiano escolar. A literatura destaca que, embora exista um consenso sobre a importância das competências socioemocionais, ainda há desafios referentes à formação docente, ao planejamento pedagógico, à avaliação e à integração dessas habilidades às políticas educacionais. Os estudos analisados permitem afirmar que o fortalecimento do bem-estar psicológico depende de estratégias contínuas que articulem práticas pedagógicas, intervenções socioemocionais e um clima escolar acolhedor.

Os dados revisados permitem concluir que as competências socioemocionais são determinantes na construção de relações saudáveis e na prevenção de comportamentos prejudiciais, como conflitos, bullying e isolamento social. Além disso, essas competências contribuem para que os estudantes desenvolvam maior capacidade de lidar com frustrações, regular emoções intensas e enfrentar situações desafiadoras, favorecendo um percurso escolar mais equilibrado. Assim, o problema da pesquisa é respondido ao evidenciar que a ausência de um trabalho socioemocional estruturado limita o pleno desenvolvimento psicológico dos alunos.

Apesar dos avanços apresentados, o estudo apresenta limitações inerentes ao método de revisão. A seleção de artigos depende da disponibilidade de publicações recentes e do acesso a bases científicas, o que pode restringir a amplitude teórica. Além disso, a diversidade conceitual das competências socioemocionais encontrada nos estudos analisados pode dificultar comparações diretas e generalizações. Essas limitações sugerem cautela na extrapolação dos resultados e reforçam a necessidade de pesquisas empíricas mais robustas e contextualizadas.

As implicações deste estudo indicam que a escola deve assumir um papel ativo na promoção do bem-estar psicológico, incorporando as competências socioemocionais como parte integral do currículo e da cultura institucional. Para isso, torna-se essencial um compromisso coletivo entre gestores, professores e comunidade, visando construir ambientes que valorizem o diálogo, a cooperação e a expressão saudável das emoções. A consolidação desse trabalho pode repercutir diretamente na aprendizagem, nas relações interpessoais e na saúde mental dos estudantes.

Diante das evidências, recomenda-se que futuras pesquisas explorem de forma mais aprofundada modelos de intervenção socioemocional aplicados em escolas brasileiras, especialmente aqueles que integrem avaliação contínua e formação docente. Estudos comparativos entre diferentes regiões, modalidades de ensino e faixas etárias também poderiam ampliar a compreensão sobre a efetividade das competências socioemocionais. Investigações longitudinais, por sua vez, permitiriam compreender os impactos duradouros dessas habilidades sobre o bem-estar psicológico e o desempenho acadêmico.

As considerações apresentadas reforçam que a promoção das competências socioemocionais no ambiente escolar não se limita a uma tendência pedagógica, mas constitui um investimento essencial para o desenvolvimento humano. Este estudo contribui ao evidenciar que, quando trabalhadas de maneira intencional, contextualizada e contínua, tais competências favorecem o bem-estar psicológico, fortalecem a convivência e ampliam as oportunidades de aprendizagem. Assim, reafirma-se a importância de práticas educativas que reconheçam o estudante em sua totalidade e que priorizem a formação de sujeitos emocionalmente saudáveis, críticos e socialmente engajados.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, G. B. S. S.; OLIVEIRA, E. C. Competências socioemocionais no currículo escolar: algumas reflexões. **Dialogia**, [S. l.], n. 41, p. e20482, 2022. DOI: 10.5585/41.2022.20482. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/dialogia/article/view/20482>. Acesso em: 17 nov. 2025.
- CARDOSO, M. I. da S.; MAGDALENA, D. A.; RAMOS, S. D.; GOMES, I. B.; LEONEL, M. de O.; OLIVEIRA, V. A. de P. Educação positiva e o desenvolvimento socioemocional dos estudantes: práticas pedagógicas para o fortalecimento da empatia, resiliência e autoestima. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [S. l.], v. 11, n. 10, p. 150–164, 2025. DOI: 10.51891/rease.v11i10.21204. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/21204>. Acesso em: 18 nov. 2025.
- CARVALHO, M. de S.; NUNES, F. C. Inteligência emocional na educação formal: uma revisão de escopo. **Revista Contexto & Educação**, [S. l.], v. 39, n. 121, p. e15485, 2024. DOI: 10.21527/2179-1309.2024.121.15485. Disponível em: <https://www.revistas.unijui.edu.br/index.php/contextoeducacao/article/view/15485>. Acesso em: 17 nov. 2025.
- HEINEN, M.; SARTORETTO, C. R.; ORTIGÃO, M. E. de S. R.; CAMINHA, R.; OLIVEIRA, M. da S. Efeitos do Trabalho de Regulação Infantil nas Competências Socioemocionais de Crianças no Ambiente Escolar. **Estudos e Pesquisas em Psicologia**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, p. 1203–1222, 2022. DOI: 10.12957/epp.2022.69839. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/revispsi/article/view/69839>. Acesso em: 17 nov. 2025.
- JUSTO, A. R.; ANDRETTA, I. Competências socioemocionais de professores: avaliação de habilidades sociais educativas e regulação emocional. **Psicol. educ.** [online]. 2020, n.50, pp.104-113. ISSN 1414-6975. https://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1414-69752020000100011. Acesso em: 17 nov. 2025.
- KOBARG, A. P. R. **Inteligência Emocional e o Desenvolvimento de Competências Socioemocionais na Formação do Professor**. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Ano 04, Ed. 10, Vol. 02, pp. 35-53. Outubro de 2019. ISSN: 2448-0959. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/educacao/competencias-socioemocionais>. Acesso em: 18 nov. 2025.
- MAINARDI, Regina Aparecida de Oliveira. **Competências socioemocionais e sua relação com a aprendizagem escolar: uma revisão de literatura**. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP), 2021. Disponível em: <https://ariel.pucsp.br/bitstream/handle/31410/1/Regina%20Aparecida%20Oliveira%20Mainardi%20-%20Monografia.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2025.
- MALTA, D. P. de L. N.; SILVA, Á. M. da S. e; PORTES, C. S. V.; GADELHA, D. de S.; MENDONÇA, I. R. L.; CARDOSO, J. C. M.; SOUZA, L. V. S. de; CAMPOS, L. D. de. A influência das metodologias ativas e das tecnologias no desenvolvimento de competências socioemocionais em escolas de tempo integral. **ARACÊ**, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 8687–8702, 2024. DOI: 10.56238/arev6n3-257. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/1512>. Acesso em: 18 nov. 2025.

NOGUEIRA, D.; SILVA, K.. Adolescentes, competências socioemocionais e o caminho da autorregulação emocional: uma introdução. **RevistAleph**, v. 2, n. 42, 2024. DOI: 10.22409/revistaleph.v2i42.60955. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/revistaleph/article/view/60955/36796>. Acesso em: 17 nov. 2025.

RICCI, T. F.; CRUZ, J. A. S. O desenvolvimento das competências socioemocionais em alunos da educação básica como ferramenta de combate ao “bullying” nas escolas. **Nuances: estudos sobre Educação**, v. 32, p. 1-18, 2021 Tradução. Disponível em: <https://doi.org/10.32930/nuances.v32i00.9116>. Acesso em: 17 nov. 2025.

SENA, W. N. de. As políticas curriculares de inserção das competências socioemocionais nas escolas brasileiras: perspectivas e desafios. **Revista Educação - UNG-Ser - ISSN 1980-6469**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. e1915100, 2025. DOI: 10.33947/educacao.v19i1.5100. Disponível em: <https://revistas.ung.br/index.php/educacao/article/view/5100>. Acesso em: 18 nov. 2025.

SILVA, K. K. A. da; BEHAR, P. A. Mapeamento de competências socioemocionais de estudantes: uma revisão sistemática. **Concilium**, 2023. Vol. 23, n.3 (2023), p. 734-752. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/259700>. Acesso em: 18 nov. 2025.

VERSUTI, F. M.; MULLE, R. L. D.; GUERREIRO, C. A. R.; MARTINS, F. P.; PERALTA, D. A. Habilidades Socioemocionais e Tecnologias Educacionais: Revisão Sistemática de Literatura. **Revista Brasileira de Informática na Educação**, [S. l.], v. 28, p. 1086–1104, 2020. DOI: 10.5753/rbie.2020.28.0.1086. Disponível em: <https://journals-sol.sbc.org.br/index.php/rbie/article/view/3993>. Acesso em: 18 nov. 2025.

**GAMIFICAÇÃO COMO ESTRATÉGIA PARA REDUZIR ANSIEDADE E AUMENTAR
ENGAJAMENTO ACADÊMICO****GAMIFICATION AS A STRATEGY TO REDUCE ANXIETY AND INCREASE ACADEMIC
ENGAGEMENT** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-009>**Silvana Maria Aparecida Viana Santos**

Mestra em Tecnologias Emergentes na Educação
Must University
E-mail: silvanaviana11@yahoo.com.br

Márcio Harrison dos Santos Ferreira

Doutorando em Agroecologia e Desenvolvimento Territorial
Universidade Federal do Vale do São Francisco
E-mail: marcio.harrison@gmail.com

Edna Margarita Pardo Prieto

Mestra em Neurociência e Biologia Comportamental
Universidad Pablo de Olávide
E-mail: margaritapardop@gmail.com

Elisabete dos Santos Silva

Mestra em Políticas Culturais e Educacionais
Instituto de Educação Kirei Saso
E-mail: lisasansilva@gmail.com

João Paulo Elias Oliveira

Mestrando em Ciências Ambientais
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco
E-mail: eliasjoaopaulo28@gmail.com

Eliomar de Jesus Santos

Mestrando em Ciências da Educação
Ivy Enber Christian University
E-mail: eliomardejesus75@gmail.com

Gabriel Mateus Silva Leite

Mestrando em Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental
Universidade Federal de Ouro Preto
E-mail: gabrielmsleite8@gmail.com

Christian Douglas Oliveira Araújo

Mestrando em Estudos Antrópicos na Amazônia
Universidade Federal do Pará
E-mail: douglas.araujo7@hotmail.com

Isaque Pinho dos Santos

Especialista em Ensino de Ciências e Matemática

Instituto Federal do Maranhão

E-mail: prof.isaque@hotmail.com

Douglas Carvalho Cordeiro

Especialista em Docência para a Educação Profissional e Tecnológica

Instituto Federal de Santa Catarina

E-mail: douglasccordeiro@gmail.com

RESUMO

A presente pesquisa teve como propósito analisar como a gamificação pode contribuir para a redução da ansiedade acadêmica e para o aumento do engajamento estudantil, considerando a crescente demanda por estratégias pedagógicas que favoreçam ambientes de aprendizagem mais motivadores e emocionalmente acolhedores. O estudo partiu do reconhecimento de que a ansiedade acadêmica tem se intensificado devido às pressões de desempenho, às exigências curriculares e à dificuldade de adaptação a metodologias tradicionais, o que evidencia a necessidade de explorar abordagens inovadoras capazes de mitigar esses impactos. Nesse sentido, a gamificação surge como uma alternativa promissora ao integrar elementos lúdicos e desafiadores que estimulam o interesse, a autonomia e o sentimento de competência dos estudantes. O objetivo central do trabalho consistiu em compreender, por meio de uma revisão de literatura, de que maneira estratégias gamificadas podem promover experiências educacionais mais engajadoras e, simultaneamente, reduzir indicadores associados à ansiedade no contexto acadêmico. Para isso, realizou-se uma revisão qualitativa e exploratória com base na análise de 14 artigos, publicados nos últimos cinco anos, selecionados nas bases Google Acadêmico e SciELO. O corpus investigativo incluiu 13 publicações em língua portuguesa e 1 em língua inglesa, priorizando estudos com fundamentação científica e alinhados ao tema. O processo de análise seguiu procedimentos de leitura criteriosa e categorização temática. Os resultados evidenciaram que a gamificação, quando aplicada de forma planejada, favorece a participação ativa, o envolvimento emocional e o compromisso dos estudantes com as atividades acadêmicas. Além disso, elementos como *feedback* contínuo, recompensas simbólicas, desafios progressivos e interação social contribuem para diminuir tensões associadas ao medo de falhar, fortalecendo a autoconfiança e a autorregulação emocional. A literatura também indicou que práticas gamificadas tornam o processo de aprendizagem mais significativo, colaborativo e dinâmico, reduzindo percepções negativas relacionadas ao desempenho. Conclui-se que a gamificação apresenta potencial efetivo como estratégia pedagógica para reduzir a ansiedade acadêmica e aumentar o engajamento estudantil, desde que aplicada de maneira contextualizada, ética e alinhada aos objetivos de aprendizagem. O estudo contribui ao reunir evidências recentes e ao reforçar a necessidade de aprofundar investigações sobre seus impactos emocionais, ampliando o debate sobre práticas educacionais inovadoras.

Palavras-chave: Gamificação; Ansiedade acadêmica; Engajamento estudantil; Metodologias ativas.

ABSTRACT

This research aimed to analyze how gamification can contribute to reducing academic anxiety and increasing student engagement, considering the growing demand for pedagogical strategies that foster more motivating and emotionally supportive learning environments. The study began with the recognition that academic anxiety has intensified due to performance pressures, curricular demands, and the difficulty of adapting to traditional methodologies, highlighting the need to explore innovative approaches capable of mitigating these impacts. In this sense, gamification emerges as a promising alternative by integrating playful and challenging elements that stimulate students' interest, autonomy, and sense of competence. The

central objective of the work was to understand, through a literature review, how gamified strategies can promote more engaging educational experiences and, simultaneously, reduce indicators associated with anxiety in the academic context. To this end, a qualitative and exploratory review was conducted based on the analysis of 14 articles published in the last five years, selected from the Google Scholar and SciELO databases. The research corpus included 13 publications in Portuguese and 1 in English, prioritizing studies with scientific foundations and aligned with the theme. The analysis process followed procedures of careful reading and thematic categorization. The results showed that gamification, when applied in a planned way, favors active participation, emotional involvement, and student commitment to academic activities. Furthermore, elements such as continuous feedback, symbolic rewards, progressive challenges, and social interaction contribute to reducing tensions associated with the fear of failure, strengthening self-confidence and emotional self-regulation. The literature also indicated that gamified practices make the learning process more meaningful, collaborative, and dynamic, reducing negative perceptions related to performance. It is concluded that gamification presents effective potential as a pedagogical strategy to reduce academic anxiety and increase student engagement, provided it is applied in a contextualized, ethical manner and aligned with learning objectives. The study contributes by gathering recent evidence and reinforcing the need for further investigation into its emotional impacts, broadening the debate on innovative educational practices.

Keywords: Gamification; Academic anxiety; Student engagement; Active learning methodologies.

1 INTRODUÇÃO

A gamificação tem se consolidado como uma estratégia educacional capaz de transformar experiências de aprendizagem ao incorporar elementos característicos dos jogos, como desafios, recompensas e progressão, em contextos pedagógicos. Em um cenário educacional marcado por demandas crescentes de desempenho, múltiplas distrações digitais e pressões emocionais, analisar como essas abordagens lúdicas podem favorecer a participação ativa dos estudantes torna-se fundamental. Nesse sentido, compreender a gamificação como objeto de estudo permite ampliar o debate sobre metodologias inovadoras que dialogam com a realidade contemporânea e com os modos atuais de interação com o conhecimento.

A relevância do tema se evidencia pela necessidade de promover ambientes de aprendizagem mais motivadores, dinâmicos e emocionalmente acolhedores. Instituições de ensino têm buscado alternativas que ultrapassem modelos tradicionais, especialmente diante do crescente número de estudantes que enfrentam dificuldades relacionadas à permanência, engajamento e bem-estar emocional. Assim, investigar a gamificação sob a perspectiva da saúde mental não apenas contribui para o avanço da área, mas também responde a uma demanda social por práticas educacionais mais humanas e inclusivas.

O problema discutido neste trabalho emerge do aumento da ansiedade acadêmica, que afeta desde a capacidade de concentração até o rendimento escolar e a qualidade da experiência educacional. Apesar da ampla adoção de recursos digitais e metodologias ativas, ainda existe uma lacuna no entendimento sobre como elementos gamificados podem, de fato, reduzir tensões emocionais e favorecer um engajamento mais significativo. Esse desafio aponta para a necessidade de estudos que integrem, de maneira consistente, aspectos emocionais e pedagógicos.

A escolha do tema se justifica pela urgência de compreender práticas que contribuam simultaneamente para o fortalecimento da motivação e para a promoção do bem-estar dos estudantes. A literatura aponta benefícios potenciais da gamificação, mas também revela limitações quando aplicada de forma superficial ou descontextualizada. Dessa forma, torna-se pertinente aprofundar essa discussão, identificando condições, mecanismos e características que tornam a gamificação um recurso eficiente no enfrentamento da ansiedade acadêmica.

O objetivo geral deste trabalho é analisar, a partir de uma revisão de literatura, de que maneira a gamificação pode atuar como estratégia para reduzir níveis de ansiedade e aumentar o engajamento acadêmico. Essa proposta busca reunir evidências teóricas e resultados de pesquisas que permitam compreender o potencial e os limites dessa abordagem, assim como sua aplicabilidade em diferentes contextos educacionais.

Do ponto de vista científico, este estudo contribui para o avanço das discussões sobre metodologias inovadoras ao integrar dimensões emocionais e cognitivas da aprendizagem. Ao sistematizar

conhecimentos já produzidos, o trabalho auxilia na consolidação de um campo que ainda está em expansão e que demanda investigações cuidadosas sobre seus efeitos na experiência estudantil. Do ponto de vista prático, os achados podem orientar educadores, gestores e pesquisadores na implementação de estratégias mais sensíveis às demandas emocionais dos estudantes.

Espera-se que esta revisão de literatura amplie a compreensão sobre a gamificação como recurso pedagógico promissor, capaz de favorecer ambientes de aprendizagem mais engajados, motivadores e emocionalmente saudáveis. Ao considerar a complexidade das vivências acadêmicas, o estudo reafirma a importância de práticas educacionais que acolham as necessidades dos estudantes e promovam trajetórias de aprendizagem mais equilibradas, participativas e significativas.

2 METODOLOGIA

Caracteriza-se como uma revisão de literatura de caráter exploratório e qualitativo, voltada à análise das contribuições da gamificação na redução da ansiedade e no aumento do engajamento acadêmico. Para garantir rigor e consistência na seleção das fontes, foram estabelecidos critérios de inclusão que consideraram publicações dos últimos cinco anos, disponíveis integralmente e relacionadas à temática central da pesquisa. Ao final do processo seletivo, compuseram o corpo analítico 14 artigos, sendo 13 em língua portuguesa e 1 em língua inglesa, contemplando estudos empíricos e teóricos alinhados aos objetivos do trabalho.

A coleta dos dados foi realizada por meio de busca estruturada nas plataformas Google Acadêmico e SciELO, priorizando artigos científicos revisados por pares. Todo o processo de triagem seguiu três etapas: leitura de títulos, análise de resumos e avaliação integral dos textos selecionados. A natureza dos materiais incluiu experiências aplicadas, análises teóricas e estudos que discutem impactos psicológicos e motivacionais de estratégias gamificadas. Esses critérios asseguraram diversidade metodológica sem comprometer a coerência temática necessária à revisão.

Para o tratamento dos dados, utilizou-se a análise temática, permitindo organizar os achados em categorias interpretativas capazes de responder ao problema de pesquisa e dialogar com o objetivo geral. As considerações éticas foram observadas ao longo de todo o processo, garantindo o uso responsável e fiel das informações, o respeito à integridade intelectual dos autores e a adequada referência das fontes consultadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com Silva e De Paulo (2025), a gamificação ativa mecanismos de recompensa no cérebro, estimulando a liberação de dopamina e fortalecendo a motivação intrínseca, especialmente quando os desafios são percebidos como significativos pelos estudantes. Essa compreensão neuropsicológica amplia

a interpretação pedagógica da gamificação, evidenciando que sua eficácia não se limita ao aspecto lúdico, mas envolve processos cognitivos profundos relacionados à percepção de competência e autonomia. Nessa perspectiva, os elementos gamificados funcionam como mediadores que contribuem para a manutenção da atenção e da persistência frente às tarefas acadêmicas. Assim, compreender essas bases permite que educadores desenvolvam práticas mais eficientes, capazes de promover envolvimento contínuo sem recorrer apenas ao reforço externo.

Conforme Pimentel e Moura (2022), a gamificação favorece o estado de flow quando alinha desafios adequados às habilidades dos estudantes, criando uma experiência de envolvimento profundo que potencializa a aprendizagem, permitindo que o aluno se concentre totalmente na atividade, perdendo a noção do tempo e sentindo satisfação intrínseca pela superação dos obstáculos propostos, o que consolida o conhecimento de maneira orgânica e profundamente significativa. Esse entendimento contribui para reforçar que o engajamento não é resultado apenas da presença de elementos visuais ou recompensas, mas do equilíbrio entre exigência cognitiva e sensação de controle. A partir desse ponto de vista, ambientes gamificados que desconsideram essa relação tendem a gerar frustração ou tédio, comprometendo o propósito pedagógico. Portanto, ao estruturar atividades gamificadas, é fundamental considerar nuances individuais, garantindo que o estudante se reconheça capaz e, ao mesmo tempo, desafiado a progredir.

Segundo Marques e Costa (2021), a gamificação no ensino superior tem assumido papel relevante para combater a desmotivação crescente, especialmente em cursos com turmas numerosas e metodologias tradicionais, ao introduzir um design lúdico e interativo que resgata o interesse e a participação ativa, transformando aulas que seriam passivas em ambientes dinâmicos e focados na resolução de problemas, promovendo uma mudança de paradigma da passividade para a proatividade discente. Os autores destacam que elementos como medalhas, missões e rankings podem incentivar a participação, mas ressalta que seu valor depende do alinhamento com objetivos pedagógicos consistentes. A crítica presente no estudo revela que a gamificação não deve ser aplicada de modo superficial, sob risco de reduzir-se a entretenimento sem impacto formativo. Dessa forma, sua implementação exige planejamento cuidadoso, que considere diversidade, carga de trabalho e ritmos de aprendizagem.

Na visão de Vasconcelos, Rezende e Kohls-Santos (2023), a gamificação fortalece o protagonismo estudantil ao promover autonomia, interação e participação colaborativa, visto que os estudantes são encorajados a tomar decisões sobre seu percurso de aprendizagem, a trabalhar em equipe para solucionar quests complexas e a desenvolver senso de responsabilidade sobre seu próprio desenvolvimento acadêmico, o que extrapola o mero conteúdo e fomenta habilidades essenciais para o mercado de trabalho.. Os autores argumentam que, ao assumir papéis ativos em desafios e missões, os estudantes desenvolvem senso de pertencimento, o que contribui diretamente para o engajamento. Essa perspectiva reforça o entendimento de que a gamificação amplia oportunidades para que os alunos experimentem processos decisórios e

reflexivos, essenciais à formação crítica. No entanto, para que esse protagonismo seja genuíno, é necessário que a gamificação não se limite a tarefas mecânicas, mas ofereça espaço para criação, escolha e construção coletiva.

Conforme Toda et al. (2024), muitos docentes demonstram receio ao implementar a gamificação devido a preocupações éticas, falta de formação e insegurança sobre seu impacto real na aprendizagem, sendo que as principais dúvidas pairam sobre como garantir a equidade entre os participantes e como mensurar os resultados de maneira confiável, evidenciando uma necessidade urgente de políticas de capacitação continuada que ofereçam suporte técnico e pedagógico para a adoção dessa abordagem em sala de aula. Esses obstáculos revelam que a resistência não está apenas na novidade tecnológica, mas na dificuldade de ressignificar práticas pedagógicas consolidadas. O estudo também evidencia que uma implementação inadequada pode gerar competição excessiva e estresse, contrariando o propósito da estratégia. Assim, compreender as barreiras docentes é essencial para qualificar formações continuadas, oferecendo suporte teórico e prático que auxilie professores a utilizar a gamificação de modo crítico e contextualizado.

Segundo Klettemberg e Nunes (2023), quando integrada a avaliações, a gamificação pode reduzir a ansiedade de teste ao transformar o ato avaliativo em um processo mais acolhedor e menos punitivo, pois a inserção de feedback imediato, a possibilidade de *retries* e a conversão de erros em oportunidades de aprendizado diminuem a pressão e o medo do fracasso, tornando o momento de verificação de conhecimento uma etapa natural e construtiva dentro da jornada de aprendizado do estudante. Essa abordagem desloca o foco do erro para o progresso contínuo, favorecendo feedbacks imediatos e oportunidades de retomada. Os autores apontam que essa dinâmica gera ambientes emocionalmente mais seguros, contribuindo para melhor desempenho. Entretanto, ressaltam que o uso inadequado de rankings e competição pode ter efeito contrário, ampliando tensão. Assim, o design das atividades precisa equilibrar desafio e suporte emocional.

De acordo com Batista *et al.* (2025), intervenções gamificadas apresentam potencial para fortalecer o bem-estar emocional de crianças e adolescentes em ambientes escolares, contribuindo para redução da ansiedade e aumento da autoestima, uma vez que a conquista de emblemas e a superação de desafios lúdicos oferecem reforço positivo, melhorando a percepção de autoeficácia e o senso de pertencimento, o que é fundamental para um desenvolvimento socioemocional equilibrado em idades cruciais. O estudo destaca que atividades gamificadas favorecem interação social e senso de pertencimento, fatores fundamentais para a saúde mental. Criticamente, observa-se que o impacto positivo depende da intencionalidade pedagógica, uma vez que a simples introdução de elementos de jogo não garante benefícios emocionais. Assim, torna-se importante adotar abordagens integradas que articulem ludicidade, suporte psicossocial e práticas inclusivas.

Consoante Cavalcante, Reinaldi e Giordani (2022), estudos de revisão sistemática demonstram que a gamificação no ensino superior apresenta avanços significativos no engajamento, especialmente em cursos da área de Administração e Ciências Contábeis, ainda que existam lacunas quanto à padronização metodológica e avaliação dos resultados. Os autores destacam que, embora a literatura revele benefícios recorrentes, muitos trabalhos carecem de detalhamento sobre o processo de implementação, dificultando a replicação em contextos diversos. A partir dessa constatação, torna-se evidente a necessidade de pesquisas mais robustas, que investiguem condições, limites e fatores intervenientes no sucesso das estratégias gamificadas. Esse panorama reforça a importância de interpretações críticas que ultrapassem análises meramente descritivas e contribuam para consolidar o campo.

Na visão de Matos e Menegat (2025), a incorporação de elementos gamificados contribuiu para melhorias expressivas no desempenho e na participação dos estudantes em disciplinas de graduação, sugerindo que a gamificação pode atuar como catalisadora de aprendizagem ativa, pois os mecanismos de recompensa e progressão incentivam o estudo contínuo e a exploração de conteúdos fora da sala de aula, demonstrando-se uma metodologia eficaz para aumentar a retenção de conceitos complexos e a aplicação prática do conhecimento. Os autores relatam que o aumento da motivação ocorreu devido à clareza das metas, ao feedback imediato e ao senso de progressão contínua proporcionado pela dinâmica gamificada. Entretanto, a pesquisa aponta que tais efeitos dependem da coerência metodológica e da integração entre jogo e conteúdo. Dessa forma, estímulos competitivos, quando mal aplicados, podem gerar exclusão ou pressão, o que reforça a necessidade de desenhos pedagógicos cuidadosos.

Segundo Ducatti *et al.* (2025), a gamificação favorece o desenvolvimento de competências socioemocionais, como comunicação, resiliência e cooperação, ao inserir desafios que demandam colaboração e tomada de decisões entre os participantes, forçando os alunos a negociar estratégias e a lidar com a frustração do insucesso em grupo, o que constrói habilidades interpessoais essenciais para a vida e a carreira, extrapolando o foco puramente cognitivo. Esse resultado evidencia que sua contribuição vai além do domínio cognitivo, abrangendo também dimensões afetivas e sociais da aprendizagem. Contudo, os autores observam que tais benefícios emergem quando a gamificação é estruturada de maneira ética, inclusiva e alinhada a objetivos formativos consistentes. Modelos puramente competitivos tendem a limitar o desenvolvimento dessas habilidades, enquanto abordagens cooperativas ampliam o potencial transformador da estratégia.

Conforme Verzegnassi, Bittencourt e Chalco (2020), o CIPEG - Catálogo de Identificação de Problemas de Engajamento em Gamificação, permite aos docentes reconhecer obstáculos que surgem em atividades gamificadas, como frustração, distração e ansiedade, possibilitando intervenções pedagógicas mais assertivas. O estudo demonstra que ambientes gamificados não são automaticamente motivadores e que podem gerar efeitos indesejáveis quando não ajustados às necessidades dos estudantes. Essa perspectiva

crítica reforça que o monitoramento contínuo faz parte do processo de implementação e que ignorar tais sinais pode comprometer a efetividade da estratégia. Portanto, ferramentas diagnósticas como o CIPEG ampliam o rigor e a responsabilidade pedagógica na aplicação da gamificação.

Na visão de Ferroni *et al.* (2024), a gamificação em cursos da área da saúde apresenta resultados promissores ao estimular aprendizagem ativa, engajamento e retenção de conhecimento em contextos que demandam alta exigência prática, permitindo que os estudantes simulem cenários clínicos e tomem decisões em um ambiente seguro, o que reduz o risco inerente ao aprendizado em situações reais e aumenta a confiança para atuar com competência após a formação. Os autores destacam que a dinâmica lúdica permite simulações seguras, experimentações e tomada de decisões em ambiente controlado, aproximando o estudante de situações reais da futura prática profissional. Todavia, afirmam que a gamificação requer planejamento cuidadoso, pois sua aplicação superficial pode reduzir conteúdos complexos a atividades simplificadas demais. Assim, torna-se essencial equilibrar ludicidade e rigor científico.

De acordo com Cohen, Delage e Alencar (2020), estudantes que participaram de uma disciplina gamificada relataram maior engajamento e sentimento de pertencimento, indicando que a gamificação pode atuar como estratégia inclusiva ao favorecer a participação de perfis diversos de alunos, visto que o design focado em diferentes formas de interação e conquista permite que indivíduos com variados estilos de aprendizagem encontrem seu espaço, superando barreiras que as metodologias tradicionais por vezes impõem. O estudo aponta que a atmosfera lúdica contribui para diminuir a insegurança e aproximar os estudantes da prática pedagógica, fortalecendo relações interpessoais. No entanto, observa-se que experiências inclusivas dependem da construção de atividades que considerem acessibilidade, diversidade de estilos de aprendizagem e respeito aos ritmos individuais. Assim, a gamificação precisa ser planejada para acolher diferentes necessidades.

Segundo Almeida *et al.* (2023), embora amplamente difundida, a gamificação pode gerar efeitos negativos, como queda no desempenho, dependência de recompensas externas, estresse competitivo e até práticas de manipulação das regras pelos estudantes, sendo crucial que o design da atividade priorize a motivação intrínseca e minimize a hierarquização excessiva entre os jogadores, de modo a evitar que a busca por pontuações ofusque o verdadeiro objetivo pedagógico da intervenção. Essas limitações evidenciam que a gamificação não é uma solução universal e que seu impacto depende diretamente do design pedagógico adotado. O estudo critica abordagens que utilizam elementos de jogo de forma reducionista, sem considerar o contexto, o perfil da turma e os objetivos educacionais. Assim, torna-se essencial adotar uma postura analítica e ética, garantindo estabilidade emocional, equidade e aprendizagem significativa.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises desenvolvidas ao longo deste estudo permitiram constatar que o objetivo geral, compreender de que maneira a gamificação pode reduzir a ansiedade acadêmica e aumentar o engajamento dos estudantes, foi plenamente alcançado. A revisão da literatura evidenciou que elementos gamificados, quando aplicados de forma pedagógica e contextualizada, contribuem tanto para o fortalecimento da motivação quanto para a criação de ambientes de aprendizagem mais acolhedores e responsivos às necessidades emocionais dos estudantes. Assim, foi possível sintetizar um conjunto coerente de práticas e resultados que reforçam a relevância da gamificação na educação contemporânea.

Os achados apontam que a ansiedade acadêmica, frequentemente associada a pressões de desempenho, falta de apoio emocional e metodologias tradicionais pouco interativas, pode ser mitigada por estratégias que promovam experiências mais imersivas e autônomas. A gamificação, ao incorporar desafios graduais, *feedback* contínuo e recompensas simbólicas, favorece o senso de progresso e a percepção de competência, diminuindo sentimentos de insegurança e frustração. Esses elementos funcionam como facilitadores emocionais, contribuindo diretamente para o enfrentamento da ansiedade.

No que se refere ao engajamento acadêmico, a literatura revisada demonstra que práticas gamificadas ampliam significativamente a participação ativa dos estudantes. A inserção de dinâmicas lúdicas torna as atividades mais atrativas e promove maior envolvimento cognitivo, emocional e comportamental. Dessa forma, a gamificação se mostra capaz de transformar ambientes de aprendizagem pouco estimulantes em experiências educativas mais participativas, colaborativas e motivadoras, respondendo adequadamente ao problema de pesquisa proposto.

Apesar dos resultados positivos, algumas limitações foram identificadas ao longo da revisão. Grande parte dos estudos analisados apresenta amostras reduzidas ou intervenções de curta duração, o que pode restringir a generalização dos resultados. Além disso, muitos trabalhos se concentram em contextos específicos, como cursos superiores ou ambientes virtuais, deixando lacunas sobre a aplicação da gamificação em outras etapas educacionais e em cenários híbridos ou presenciais mais diversificados.

Outra limitação observada diz respeito à falta de padronização na implementação das estratégias gamificadas. A diversidade de metodologias, ferramentas e indicadores utilizados nas pesquisas dificulta comparações diretas e o estabelecimento de modelos amplamente replicáveis. Ainda assim, essas variações demonstram que a gamificação permanece como um campo fértil e em constante expansão, permitindo múltiplas abordagens e adaptações conforme as necessidades de cada contexto educativo.

Considerando essas limitações, torna-se necessário ampliar investigações futuras que adotem desenhos metodológicos mais robustos, com amostras maiores e acompanhamento longitudinal. Além disso, pesquisas que explorem variáveis emocionais de maneira integrada, incluindo autoestima, autonomia

e regulação emocional, podem aprofundar a compreensão dos mecanismos pelos quais a gamificação atua na redução da ansiedade e na promoção do engajamento.

Este estudo reforça que a gamificação não deve ser vista apenas como uma técnica motivacional, mas como uma estratégia pedagógica com potencial transformador. Quando aplicada de forma intencional e sensível às necessidades dos estudantes, ela pode fomentar ambientes educacionais mais humanos, participativos e emocionalmente saudáveis. Recomenda-se que instituições e educadores explorem suas possibilidades práticas, adaptando elementos gamificados de maneira ética, equilibrada e alinhada aos objetivos formativos, garantindo assim contribuições efetivas para o processo de ensino e aprendizagem.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C.; KALINOWSKI, M.; UCHOA, A.; FEIJÓ, B. Negative Effects of Gamification in Education Software. *arXiv*, Information and Software Technology, Volume 156, April 2023, 107142. DOI: 10.15628/holos.2020.7597. Disponível em: <https://10.1016/j.infsof.2022.107142>. Acesso em: 17 nov. 2025.
- BATISTA, Wagner Roberto et al. GAMIFICAÇÃO NO ENSINO: A IMPORTÂNCIA DOS JOGOS E DESAFIOS PARA A APRENDIZAGEM DOS ESTUDANTES. *LUMEN ET VIRTUS*, [S. l.], v. 16, n. 48, p. 5112–5121, 2025. DOI: 10.56238/levv16n48-043. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/LEV/article/view/5092>. Acesso em: 16 nov. 2025.
- CAVALCANTE, Valkiria Farias do Rosário; REINALDI, Maria Aldinete de Almeida; GIORDANI, Annecy Tojeiro. Revisão sistemática da literatura sobre gamificação no ensino superior em administração e ciências contábeis. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 11, n. 10, p. e590111032277, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i10.32277. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/32277>. Acesso em: 16 nov. 2025.
- COHEN, Eileen Júlia; DELAGE, Paulo Elias G A; ALENCAR, Renan Batista; MENEZES, Aline Beckmann. Percepção dos estudantes em relação a uma experiência de gamificação na disciplina de psicologia e educação inclusiva. *HOLOS*, [S. l.], v. 1, p. 1–15, 2020. DOI: 10.15628/holos.2020.7597. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/7597>. Acesso em: 17 nov. 2025.
- DUCATTI, A. P. S.; CAZANE, A. L.; DONEDA, L. R. Z. D. C.; PARDO, P.; JORGE, C. F. B. Gamificação no Ensino Superior para o desenvolvimento de Soft Skills: uma Revisão Sistemática da Literatura. *Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação*, Araraquara, v. 20, n. 00, p. e19429, 2025. Disponível em: <https://periodicos.fclar.unesp.br/iberoamericana/article/view/19429>. Acesso em: 16 nov. 2025.
- FERRONI, Tatiana Valois de Sá; REIS, Guilherme Ferreira dos; RODRIGUES, Jose Augusto; FIGUEIREDO, Luciene Cristina de. Impacto da gamificação na motivação e engajamento em cursos de saúde. *RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218*, [S. l.], v. 5, n. 12, p. e5126053, 2024. DOI: 10.47820/recima21.v5i12.6053. Disponível em: <https://recima21.com.br/recima21/article/view/6053>. Acesso em: 17 nov. 2025.
- KLETTENBERG, J. S.; NUNES, F. B. Gamificação e ansiedade de teste: Considerações sobre as avaliações escolares. *Revista Tecnologias Educacionais em Rede (ReTER)*, [S. l.], v. 4, n. 1, p. e4/1–22, 2023. DOI: 10.5902/2675995072175. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reter/article/view/72175>. Acesso em: 16 nov. 2025.
- MARQUES, Glaucia Diniz; COSTA, Fernando Albuquerque. Gamificação no ensino superior: uma análise de estudos acadêmicos realizados em Portugal e no Brasil. *#Tear: Revista de Educação, Ciência e Tecnologia*, Canoas, v. 10, n. 1, 2021. DOI: 10.35819/tear.v10.n1.a5035. Disponível em: <https://periodicos.ifrs.edu.br/index.php/tear/article/view/5035>. Acesso em: 16 nov. 2025.
- MATOS, Tauller Augusto de Araújo; MENEGAT, Jardelino. Impacto da gamificação no engajamento e desempenho acadêmico: estudo de caso em um curso superior. *Revista Internacional de Educação Superior*, Campinas, SP, v. 12, n. 00, p. e026036, 2025. DOI: 10.20396/riesup.v12i00.8678262.

Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/riesup/article/view/8678262>. Acesso em: 19 nov. 2025.

PIMENTEL, Fernando Silvio Cavalcante; MOURA, Esmeralda Cardoso de Melo. GAMIFICAÇÃO E APRENDIZAGEM: COGNIÇÃO E ENGAJAMENTO COMO POSSIBILIDADES DIANTE DA PANDEMIA. **HOLOS**, [S. l.], v. 1, 2022. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/10896>. Acesso em: 16 nov. 2025.

SILVA, Rômulo Batista da; DE PAULO, Jacks Richard. Gamificação na Educação: as bases neurológicas e psicológicas para sua utilização. **Revista Tecnia**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. e90023, 2025. DOI: 10.56762/tecnia.v9i2.1589. Disponível em: <https://periodicos.ifg.edu.br/tecnia/article/view/1589>. Acesso em: 16 nov. 2025.

TODA, A. M.; PALOMINO, P. T.; RODRIGUES, L.; KLOCK, A. C. T.; PEREIRA, F. D.; BORGES, S. de S.; GASPARINI, I.; OLIVEIRA, E. H. T. de; ISOTANI, S.; CRISTEA, A. I. Preocupações dos professores brasileiros com o uso da gamificação na educação: barreiras percebidas para sua adoção. **Revista Brasileira de Informática na Educação**, [S. l.], v. 32, p. 510–532, 2024. DOI: 10.5753/rbie.2024.3228. Disponível em: <https://journals-sol.sbc.org.br/index.php/rbie/article/view/3228>. Acesso em: 19 nov. 2025.

VASCONCELOS, Nancy Moreira.; REZENDE, Rita de Cássia de Almeida; KOHLS-SANTOS, Pricila. Gamificação – uma possibilidade de engajamento e protagonismo dos estudantes. **Revista JRG de Estudos Acadêmicos**, Brasil, São Paulo, v. 6, n. 12, p. 09–20, 2023. DOI: 10.55892/jrg.v6i12.459. Disponível em: <https://revistajrg.com/index.php/jrg/article/view/459>. Acesso em: 16 nov. 2025.

VERZEGNASSI, E.; BITTENCOURT, I.; CHALLCO, G. (2020). **Identificação de problemas de engajamento em ambientes gamificados e jogos utilizados na educação básica**. Anais dos Trabalhos de Conclusão de Curso. Pós-Graduação em Computação Aplicada à Educação Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação. Universidade de São Paulo.

**OXIDAÇÃO AERÓBICA DE ÁLCOOIS CATALIZADA POR OURO E PALÁDIO
SUPPORTADOS EM ÓXIDO DE CÉRIO (CeO₂): UMA REVISÃO DE ESCOPO****AEROBIC OXIDATION OF ALCOHOLS CATALYZED BY GOLD AND PALLADIUM
SUPPORTED ON CERIUM OXIDE (CeO₂): A SCOPING REVIEW** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-010>**Renilma Carvalho Sousa**

Mestre em Química

Universidade Federal do Piauí – UFPI

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9970-6665>**Pelrry da Silva Costa**

Mestre em Química

Universidade Federal do Piauí – UFPI

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0387-3099>**Jean Cláudio Santos Costa**

Doutor em Físico-Química

Universidade de São Paulo - USP

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3037-2329>**Edmilson Miranda de Moura**

Doutor em Química

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1527-5037>**RESUMO**

Esta revisão de escopo, conduzida conforme as diretrizes PRISMA-ScR, teve como objetivo mapear evidências sobre o uso de catalisadores de Au, Pd e sistemas Au–Pd suportados em CeO₂ na oxidação aeróbica de álcoois. A questão de pesquisa foi estruturada pelo modelo PCC (População, Conceito e Contexto), e as buscas foram realizadas nas bases Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect e SpringerLink, considerando o período de 2015 a 2025. Ao todo, 18 estudos foram incluídos. Os resultados indicam que o alto desempenho desses catalisadores decorre da natureza interfacial e multifuncional do sistema metal–suporte, que estabiliza espécies ativas (Au^{δ+}, Pd²⁺) e explora o ciclo redox Ce⁴⁺/Ce³⁺, favorecendo vacâncias de oxigênio essenciais à ativação do O₂. Persistem, porém, lacunas quanto à influência da morfologia e à baixa exploração de álcoois alifáticos, predominando o álcool benzílico como substrato. Os achados reforçam a necessidade de estudos mais amplos e sistemáticos para orientar avanços na área.

Palavras-chave: Au–Pd; CeO₂; Oxidação aeróbica de álcoois.**ABSTRACT**

This scoping review, conducted in accordance with PRISMA-ScR guidelines, aimed to map the existing evidence on the use of Au, Pd, and Au–Pd bimetallic catalysts supported on CeO₂ for the aerobic oxidation of alcohols. The research question was formulated using the PCC framework (Population, Concept, and Context), and searches were carried out in Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, and

SpringerLink, covering the period from 2015 to 2025. In total, 18 studies were included. The findings indicate that the high catalytic performance of these systems arises from the interfacial and multifunctional nature of the metal–support interaction, which stabilizes active species ($\text{Au}^{\delta+}$, Pd^{2+}) and leverages the $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ redox cycle of CeO_2 , promoting the formation of oxygen vacancies essential for O_2 activation. However, gaps remain regarding the influence of catalyst morphology and the limited exploration of aliphatic alcohols, given the predominance of benzyl alcohol as the model substrate. Overall, the results highlight the need for broader and more systematic investigations to advance the field.

Keywords: Au–Pd; CeO_2 ; Aerobic alcohol oxidation.

1 INTRODUÇÃO

Oxidação seletiva de álcoois em aldeídos, cetonas e ácidos correspondentes tem sido amplamente estudado devido a sua importância na indústria de química fina englobando as áreas farmacêuticas, agrônômicas, perfumes e aditivos alimentares (Bai *et al.*, 2022; Su *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2026). Os principais processos industriais envolvem a utilização de reagentes estequiométricos tóxicos baseados em cromatos e permanganatos, os quais geram resíduos tóxicos como subprodutos dessas reações, indo em contrapartida à tendência global por processos mais sustentáveis, seletivos e eficientes de acordo com os princípios da química verde (Anastas *et al.*, 2000; Anastas; Kirchhoff, 2002; Guo *et al.*, 2014; Hu *et al.*, 2019). Oxidantes mais benignos como O_2 molecular e H_2O_2 são utilizados como alternativas, pois geram apenas água como subproduto da reação (Hu *et al.*, 2019; Ren *et al.*, 2025).

Catalisadores heterogêneos têm apresentado vantagens em relação aos catalisadores homogêneos devido a sua capacidade de recuperação, estabilidade térmica e disponibilidade de sítios ativos. Nos últimos anos nanopartículas (NPs) metálicas baseadas em ouro (Au) (Choudhary *et al.*, 2005; Lin *et al.*, 2022; Shi *et al.*, 2025) e paládio (Pd) (Hu *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2026) suportadas foram desenvolvidos para reações de oxidação seletiva de álcoois, assim como seus correspondentes bimetálicos (Akinsanya *et al.*, 2025; Bai *et al.*, 2022). Com a descoberta da atividade do Au, quando nanoestruturado, por Haruta *et al.* (1987) na oxidação de CO, sua aplicação em reações de oxidação ganhou destaque alinhado a sensibilidade ao estado eletrônico e interação com o suporte. O paládio, por sua vez, é reconhecido por sua capacidade de ativar moléculas de oxigênio, porém tendem a formar hidretos em decorrência da abstração de hidrogênio, favorecendo a desativação do catalisador (Ran *et al.*, 2024). Assim, ligas bimetálicas de AuPd têm apresentado aprimoramento na atividade catalítica ao mesmo tempo que preservam ou aumentam a seletividade do processo a partir da combinação sinérgicas e efeitos eletrônicos dos dois metais.

O suporte para as NPs metálicas pode influenciar a atividade catalisadora ao participar da reação. Óxidos redutíveis, como CeO_2 , são considerados os mais ativos devido à sua excelente capacidade de armazenamento de oxigênio, interação metal-suporte e a facilidade de mudanças de estado de oxidação de Ce^{+3} para Ce^{+4} devido a sua capacidade redox (Feng *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2020). Alterações morfológicas no suporte de CeO_2 podem influenciar na atividade catalítica do catalisador melhorando a dispersão e tamanho das NPs, disponibilidade de sítios ativos e influenciar na criação de defeitos estruturais e vacâncias de oxigênio na rede cristalina do CeO_2 (Kanakikodi *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2025). Apesar desses avanços, a diversidade de metodologias de preparação, condições reacionais, morfologias dos catalisadores e tipos de álcoois investigados dificulta a comparação direta entre estudos e limita a formulação de conclusões gerais.

Diante desse cenário, torna-se necessário um mapeamento abrangente e sistemático da literatura que permita identificar tendências, lacunas de conhecimento e oportunidades para inovação. Assim, esta revisão

de escopo tem como objetivo analisar criticamente a pesquisa existente sobre a oxidação de álcoois catalisada por CeO_2 , Au/CeO_2 , Pd/CeO_2 e sistemas bimetálicos Au-Pd/CeO_2 , descrevendo métodos de síntese, características estruturais, condições reacionais, desempenho catalítico e mecanismos propostos. Ao consolidar e organizar esse corpo de evidências, busca-se fornecer uma visão integrada do estado da arte e orientar o desenvolvimento de catalisadores mais eficientes, seletivos e sustentáveis para aplicações futuras na química de oxidação.

2 METODOLOGIA

2.1 DESENHO DA REVISÃO

A metodologia foi estruturada como uma Revisão de Escopo (*Scoping Review*) com o objetivo de mapear sistematicamente a literatura sobre a temática. Foram seguidas estritamente as diretrizes do PRISMA-ScR (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses — Scoping Review*) (Tricco *et al.*, 2018) para garantir a transparência, o rigor metodológico e a reprodutibilidade do processo (Peters *et al.*, 2015).

2.2 QUESTÃO NORTEADORA

A Questão Norteadora foi formulada para alinhar o escopo da revisão com os objetivos de síntese focados na relação estrutura–propriedade–atividade dos catalisadores.

Questão Norteadora: *"Quais são as características estruturais, composicionais e reacionais de catalisadores de Au, Pd e bimetálicos Au-Pd suportados em CeO_2 que influenciam a atividade, a seletividade e a estabilidade na oxidação aeróbica de álcoois, e quais são os mecanismos propostos para esta reação?"*

2.3 ESTRUTURA DA QUESTÃO DE PESQUISA (PCC)

A questão de pesquisa foi formalizada utilizando o modelo PCC (População, Conceito, Contexto), para delimitar com precisão os elementos-chave da busca:

- **P (População):** Catalisadores metálicos Au, Pd, e sistemas bimetálicos Au-Pd.
- **C (Conceito):** Oxidação aeróbica de álcoois.
- **C (Contexto):** Catalisadores suportados em óxido de cério (CeO_2).

2.4 ESTRATÉGIA DE BUSCA

A busca bibliográfica foi conduzida em cinco bases de dados científicas de alto impacto (Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, Springer Link), garantindo uma cobertura abrangente da literatura

revisada por pares. A *string* de busca unificada aplicada em todas as bases foi: "*alcohol oxidation*" AND *aerobic* AND (*Au* OR *Pd* OR "*Au-Pd*" OR *bimetallic*) AND *CeO₂*".

O número de *hits* iniciais obtidos com esta *string* em cada base, antes da deduplicação, foi: Scopus (8), Web of Science (19), PubMed (4), Science Direct (16) e Springer (44). A data da busca final foi 13 de outubro de 2025.

2.5 CRITÉRIOS DE ELEGIBILIDADE E FILTROS OPERACIONAIS

Os critérios de inclusão e exclusão foram definidos para refinar a relevância dos resultados:

- **Período Temporal:** O foco nessa janela temporal (2015–2025) visa capturar a literatura mais contemporânea e tecnologicamente relevante. Este período coincide com a intensificação das pesquisas em engenharia de nanopartículas bimetálicas de Au–Pd e no aprofundamento do entendimento sobre as vacâncias de oxigênio do óxido de cério (CeO₂) como sítios ativos. Os avanços recentes nas técnicas de síntese e caracterização (e.g., operando e *in situ*), essenciais para elucidar a sinergia entre Au, Pd e CeO₂, são predominantes nesta década, refletindo o estado da arte na otimização da atividade e estabilidade catalítica.
- **Tipo de Documento:** Exclusivamente artigos de pesquisa originais (excluindo-se revisões, patentes, anais de conferências e cartas).
- **Idioma:** Sem restrição de idioma.
- **Relevância Temática:** Estudos que abordem especificamente a oxidação aeróbica de álcoois utilizando catalisadores de Au, Pd, ou Au–Pd suportados em CeO₂.

2.6 PROCESSO DE SELEÇÃO E CALIBRAÇÃO

O processo de seleção seguiu o fluxo rigoroso de triagem, a ser detalhado no fluxograma PRISMA-ScR.

- **Coleta e Deduplicação:** Os registros exportados foram gerenciados e as duplicatas removidas.
- **Triagem (Título e Resumo):** Uma avaliação inicial foi realizada por dois revisores independentes (Revisor A e Revisor B) para excluir estudos que não atendiam aos critérios temáticos ou de tipo de documento.
- **Calibração da Triagem:** Para garantir a objetividade e reprodutibilidade do processo de seleção de artigos (triagem), conduziu-se uma etapa de calibração e avaliação da concordância inter-revisores. Uma amostra aleatória inicial (10% do total de artigos identificados) foi submetida à triagem por dois revisores, que realizaram a avaliação de forma independente. A concordância foi quantificada pelo coeficiente Kappa de Cohen (κ) (Cohen, 1960). Discrepâncias na inclusão/exclusão foram resolvidas via discussão e consenso, resultando na

uniformização dos critérios de elegibilidade. O processo de triagem em larga escala foi iniciado somente após o alcance de um valor de κ classificado como substancial (i.e., $\kappa \geq 0,61$), conforme a escala de Landis e Koch (1977), atestando a confiabilidade da seleção.

- **Elegibilidade (Texto Completo):** A leitura do texto completo dos artigos pré-selecionados foi realizada por ambos os revisores para confirmar a aderência total aos critérios de inclusão. Divergências foram resolvidas por discussão ou pela intervenção de um terceiro revisor, se necessário.
- **Inclusão Final:** Os artigos elegíveis foram integrados à fase de síntese dos dados.

2.7 EXTRAÇÃO E SÍNTESE DE DADOS

A extração de dados concentrou-se nos elementos cruciais para a análise da relação estrutura–propriedade–atividade e a influência das características do catalisador no desempenho. Foi utilizada uma ficha de extração padronizada (planilha *Microsoft Excel*), desenvolvida especificamente para esta revisão.

As variáveis extraídas incluíram:

- **Características do Catalisador:** Composição (Au, Pd, Au–Pd), método de síntese e propriedades estruturais (tamanho de partícula, fases cristalinas).
- **Condições Reacionais:** Tipo de álcool (primário, secundário), solvente, temperatura, pressão parcial de O₂ e tempo de reação.
- **Métricas Catalíticas:** Conversão, seletividade ao produto desejado, rendimento e estabilidade (*Turnover Frequency* — *TOF*).
- **Evidência Mecanística:** Proposições sobre o mecanismo da oxidação de álcoois.

A extração foi realizada pelo Revisor A e verificada duplamente pelo Revisor B, minimizando erros. A síntese dos dados foi conduzida de forma narrativa e comparativa, com a construção de tabelas e gráficos conceituais para identificar padrões de desempenho e lacunas teóricas/metodológicas.

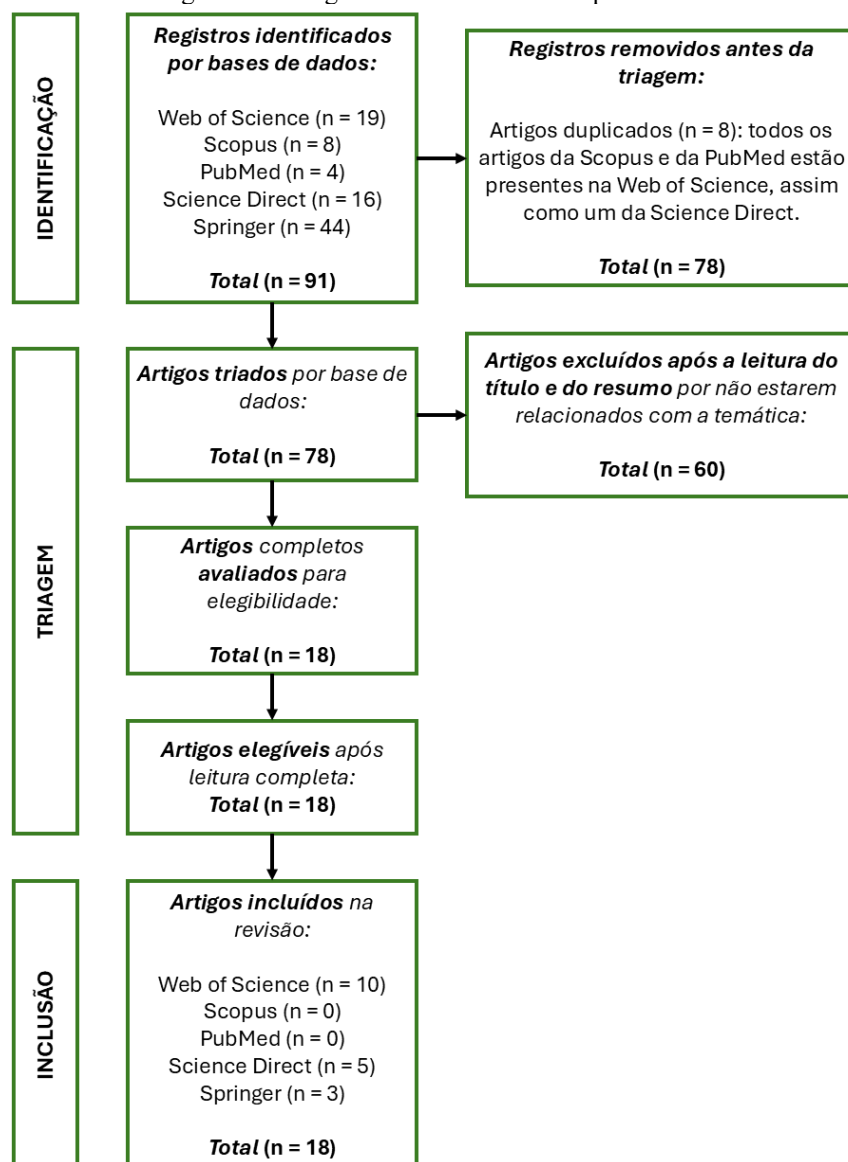
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 FLUXO DE SELEÇÃO, RIGOR METODOLÓGICO E DISTRIBUIÇÃO DOS ESTUDOS

O processo de seleção dos artigos seguiu rigorosamente as diretrizes do PRISMA-ScR (Tricco *et al.*, 2018), detalhado no diagrama de fluxo (

Figura 1). A busca inicial nas cinco bases de dados resultou na identificação de 91 registros. Após a remoção de $n = 13$ duplicatas, $n = 78$ artigos foram submetidos à triagem por título e resumo. Nesta fase, $n = 60$ artigos foram excluídos por não atenderem aos critérios de elegibilidade, resultando em $n = 18$ artigos que foram avaliados em texto completo e, por fim, incluídos na síntese final.

Figura 1. Fluxograma da revisão de escopo

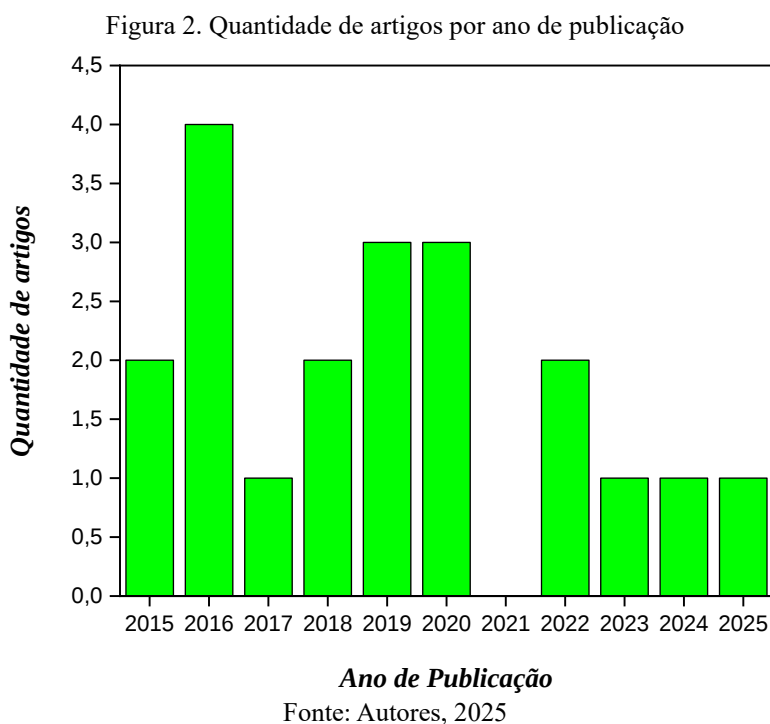


Fonte: Autores, 2025

O rigor metodológico do processo de triagem foi confirmado pela avaliação da concordância inter-revisores, conduzida em 10% da amostra. Foi atingido um Coeficiente Kappa de Cohen de $\kappa = 0.95$, valor que indica um nível de concordância quase perfeita (Landis e Koch, 1977), atestando a alta confiabilidade na aplicação dos critérios de seleção.

A análise da origem dos $n = 18$ artigos incluídos demonstra uma concentração de evidências. As bases Web of Science (WoS) e Science Direct foram as de maior contribuição, responsáveis por 10 e 5 artigos únicos, respectivamente. A base Springer Link contribuiu com 3 artigos únicos. As bases Scopus ($n = 8$) e PubMed ($n = 4$) não contribuíram com artigos únicos, pois todos os seus registros foram identificados como duplicatas presentes no WoS e, assim, removidos antes da triagem, juntamente com 1 duplicata do Science Direct.

A distribuição dos $n = 18$ artigos incluídos ao longo do período de 2015 a 2025 revela um campo de pesquisa com interesse sustentado. Conforme ilustrado na Figura 2, a maior densidade de artigos foi observada nos anos de 2016 ($n = 4$), 2019 ($n = 3$) e 2020 ($n = 3$), totalizando 55.6% da amostra final. Este padrão indica que, embora a investigação sobre Au e/ou Pd suportados em CeO_2 seja contínua, houve picos de atividade que podem estar relacionados ao sucesso e à disseminação de metodologias de síntese específicas ou à publicação de estudos seminais que validaram o alto desempenho desses sistemas catalíticos. A constância na publicação ao longo da década valida o corte temporal adotado e confirma a relevância perene da otimização de catalisadores heterogêneos para a oxidação aeróbica de álcoois.



Essa distribuição evidencia que uma estratégia de busca focada nas bases Web of Science e Science Direct é essencial para cobrir a literatura de alto impacto sobre catálise com Au/Pd suportados em CeO_2 , e que a exclusão de duplicatas foi rigorosa.

3.2 SÍNTESE DE DADOS E RELAÇÃO ESTRUTURA–PROPRIEDADE–ATIVIDADE

A extração de dados foi conduzida para mapear os elementos cruciais que definem a performance catalítica e a natureza dos sítios ativos, conforme o objetivo da Questão Norteadora. A

Tabela 1 sumariza as principais informações extraídas dos $n = 18$ artigos, concentrando-se nas características do catalisador (composição, método de síntese, tamanho de partícula), condições reacionais (substrato, temperatura) e métricas catalíticas (Conversão, Seletividade e Frequência de Rotação — TOF).

O exame desta síntese de dados é essencial para a análise comparativa entre os sistemas Au/CeO₂, Pd/CeO₂ e Au-Pd/CeO₂ e para identificar os fatores estruturais e composicionais que influenciam diretamente a atividade (mensurada pelo TOF) e a seletividade na oxidação aeróbica de álcoois. A discussão subsequente é baseada em tendências observadas nestes parâmetros, destacando a sinergia bimetálica e o papel funcional do suporte de óxido de cério.

Tabela 1. Síntese Comparativa do Desempenho Catalítico (TOF, Seletividade) e Propriedades Estruturais (Composição, Tamanho de Partícula) dos Catalisadores Au, Pd e Au-Pd Suportados em CeO₂

Artigo (Autor, Ano)	Objetivos	Material Catalítico	Reação Modelo	Condições Reacionais	CeO ₂ : Função e Estrutura	Mecanismo/ Relação Estrutura-Atividade Chave	Desempenho e TOF Máximo (Ou Conversão/Seletividade)
Deng <i>et al.</i> (2015)	Desenvolver um catalisador Pd/CeO ₂ para a conversão oxidativa em um único pote de compostos modelo de lignina (PP-ol) e lignina real, elucidando o mecanismo sequencial (tandem).	Pd/CeO ₂ (PdNPs 2.1 nm)	PP-ol (Modelo Lignina) → Fenol, Acetofenona, MB	Metanol, 0.1 MPa O ₂ , 185 °C (458 K)	CeO ₂ : Suporte que catalisa a clivagem da ligação β-O-4 e Cα-Cβ no intermediário cetônico.	Catálise Sequencial (Tandem): Pd oxida Cα-OH → Cα=O. A CeO ₂ ativa a clivagem do intermediário PP-one, demonstrando a sinergia Pd-CeO ₂ .	Conversão PP-ol: 64%. Estabilidade por 5 ciclos.
Kong <i>et al.</i> (2016)	Fabricar microesferas yolk-shell magnéticas Pd/Fe ₃ O ₄ @mCeO ₂ para oxidação seletiva, livre de solvente, de álcool benzílico, garantindo alta separabilidade e magnética e reciclabilidade.	Pd/Fe ₃ O ₄ @mCeO ₂ (Estrutura Core-Shell Magnética)	Álcool Benzílico → Benzaldeído	Livre de solvente, O ₂ (atm), 100 °C (373 K)	Suporte Redutivo mCeO ₂ : Casca mesoporosa que oferece alta capacidade de transporte e ativação de oxigênio (Ce ⁴⁺ /Ce ³⁺).	Vacâncias de Oxigênio: O _v ativa o O ₂ para remover H do Pd (desidrogenação oxidativa), regenerando sítios ativos.	TOF máximo: 443.5 h ⁻¹ . Conversão: 80.5%; Seletividade: 94.8%.
Lolli <i>et al.</i> (2016)	Preparar CeO ₂ mesoporosa (método hard-template) como suporte para Au, para a oxidação	Au/CeO ₂ Mesoporous	HMF → FDCA (Oxidação de Álcool Primário)	Água, 10 bar O ₂ , 70 °C, NaOH	CeO ₂ Mesoporous: Oferece alta S.A. e defeitos, aumentando a capacidade de armazenamento/	Contato Íntimo Metal-Suporte: A atividade máxima requer baixa SiO ₂ residual	Rendimento FDCA: 92%.

	seletiva de 5-hidroximetilfurfural (HMF) a FDCA, focando no contato íntimo metal-suporte.				mobilidade de oxigênio.	e a remoção do estabilizador PVP, o que maximiza a forte interação Au–CeO ₂ .
Santra et al. (2016b)	Determinar o papel das vacâncias de óxido em CeO ₂ dopada com Bi para a oxidação aeróbica seletiva de álcoois, elucidando o papel cooperativo de Bi, Ce e Au.	Au/Bi(6%)CeO ₂ (CeO ₂ Dopada com Bi)	Álcool Benzílico → Benzaldeído	Tolueno, O ₂ (atm), 110 °C	CeO ₂ : Dopagem com Bi aumenta a concentração de vacâncias de oxigênio e promove a dispersão de Au (NPs~4 nm).	Sinergia Bi–Ce–Au: O aumento de O _v e Au ^{δ+} (catiônico) correlaciona-se com a atividade. Au aumenta a basicidade, facilitando a desprotonação do álcool. TOF:0.144 s ⁻¹ . Conversão: 60%; Seletividade: >99%. Ea:34.1 kJ mol ⁻¹ .
Santra et al. (2016a)	Reportar a preparação de soluções sólidas de óxido misto Ce–Sn nanocristalina e mesoporosas, suportar Au e testar na oxidação aeróbica de álcoois, correlacionando a atividade com vacâncias de óxido e propriedades ácido-base.	Au/Ce–Sn (Óxido Misto Mesoporoso)	Álcool Benzílico → Benzaldeído	Tolueno, O ₂ (atm), 100 °C	CeO ₂ (CexSn1–x O ₂): Sn promove a sinergia. Mantém a estrutura de fluorita. Limita o crescimento dos cristalitos de CeO ₂ .	Mecanismo Mars-Van Krevelen: Au quimissorve O ₂ . Sn e Au aumentam a redutibilidade e as vacâncias de óxido, facilitando o ciclo redox Ce ³⁺ /Ce ⁴⁺ . TOF:0.088 s ⁻¹ . Conversão: 42.3%; Seletividade: >99%.
Li et al. (2017)	Fabricar nanofibras Au/CeO ₂ por eletrofiação para fotocatalise seletiva na oxidação de álcool benzílico sob luz visível, analisando a otimização da absorção plasmônica.	Au/CeO ₂ (Nanofibras por Eletrofiação)	Álcool Benzílico → Benzaldeído	Acetonitrila, O ₂ (atm), Luz Visível (λ>420 nm)	CeO ₂ (Nanofibras): Atua como captador de O ₂ (vacâncias) no ciclo fotocatalítico.	Fotocatalise Plasmônica (LSPR): Au NPs (37 nm no ótimo) injetam elétrons quentes. Atividade depende do equilíbrio LSPR vs. atividade superficial. 100% Seletividade. Conversão: 10x maior que CeO ₂ pura (na luz visível).

Caminhos da Pesquisa Multidisciplinar

Kohantorabi & Gholami (2018)	Sintetizar o nanocompósito o ternário Au/CeO ₂ @g-C ₃ N ₄ para oxidação seletiva de álcool benzílico, estudando sua cinética e mecanismo.	Au/CeO ₂ @g-C ₃ N ₄ (Nanocompósito Ternário)	Álcool Benzílico → Benzaldeído	Acetonitrila, 10 bar O ₂ , 90 °C	CeO ₂ (Nanospheres): Parte do suporte CeO ₂ @g-C ₃ N ₄ , facilitando a transferência de elétrons e a redução da energia de ativação.	Efeito Sinérgico Ternário: A baixa Ea (19.378 kJ mol ⁻¹) sugere que a sinergia Au/CeO ₂ /g-C ₃ N ₄ otimiza o ciclo catalítico.	TOF:36.6 h ⁻¹ . Conversão: 52%; Seletividade: 99%.
Xin et al. (2018)	Determinar a espécie ativa (átomos isolados vs. clusters) para a oxidação aeróbica de álcoois, preparando catalisadores Pd/CeO ₂ uniformes e estequiometricamente precisos (Pd ₁ e Pd ₆).	Pd ₁ /CeO ₂ (Átomos Isolados)	Álcool Benzílico → Benzaldeído	Tolueno, O ₂ (atm), 100 °C	CeO ₂ (Nanobastões (111)): A superfície fornece os sítios reativos de O que aceitam H dissociado.	Átomos Isolados Pd ₁ Ativos: Pd ₁ interage fortemente com CeO ₂ e facilita a transferência de H dissociado. Clusters Pd ₆ são inativos.	TOF:6739 h ⁻¹ (mais alto reportado). 100% Seletividade. Excelente estabilidade (10 ciclos).
Hu et al. (2019)	Desenvolver catalisadores Pd/CeO ₂ -NG para oxidação aeróbica seletiva de álcool benzílico a benzaldeído, em condições livres de solvente, explorando o efeito sinérgico entre Pd, CeO ₂ e NG.	Pd/CeO ₂ -NG (Compósito Ternário)	Álcool Benzílico → Benzaldeído	Livre de solvente, O ₂ (atm), 160 °C	CeO ₂ promove a dispersão do Pd e é um doador de elétrons para o Pd (aumentando Pd ⁰).	Efeito Sinérgico Pd-CeO ₂ : Aumento da densidade eletrônica do Pd e da razão Pd ⁰ é crucial.	TOF:30.74 s ⁻¹ . Conversão: 44.5%; Seletividade: 99.6%.
Lei et al. (2019)	Discriminar os sítios ativos (Au-SA vs. Au-NC vs. Au-NP) suportados em nanobastões de CeO ₂ , elucidando o papel dos átomos isolados de Au e das	Au-SA/CeO ₂ -NR (Átomos Isolados)	Álcool Benzílico → Benzaldeído	Tolueno, O ₂ (atm), 100 °C	CeO ₂ (Nanobastões (110)): A maior fração de Ce ³⁺ (29%) fornece alta concentração de Ov.	Sítio Interfacial [O-Ov-Ce-O-Au]: O Au catiônico isolado (Au ³⁺ /Au ⁺) promove eliminação de β-hidreto, e a O _v facilita a dissociação O-H do álcool.	TOF mais alto no grupo Au. Ea:20.9 kJ mol ⁻¹ . Conversão: 89%; Seletividade: 94%.

Caminhos da Pesquisa Multidisciplinar

	vacâncias de oxigênio (O_v).						
Song <i>et al.</i> (2019)	Demonstrar a eficiência do Au/CeO ₂ na conversão oxidativa do composto modelo de lignina (PP-ol) e lignina real, elucidando o mecanismo de ativação do oxigênio.	Au/CeO ₂ (Nanobastões)	PP-ol (Modelo Lignina) → Fenol, Benzoato, Cetona	Metanol, 1 MPa O ₂ , 180 °C (453 K)	CeO ₂ : Suporte essencial na ativação do O ₂ para a clivagem da ligação β-O-4.	Ânion Radical Superóxido (O ₂ ^{•-}): Au/CeO ₂ ativa o O ₂ molecular para formar o O ₂ ^{•-} (detectado por ESR), que é a espécie ativa para a conversão de lignina.	Conversão PP-ol: 71.5%.
Keshri <i>et al.</i> (2020)	Investigar o papel promocional do dopante Bi ³⁺ em potencializar a mobilidade de oxigênio e os defeitos de rede em diferentes polimorfos de CeO ₂ (nanobastões e nanocubos) para otimizar o desempenho.	Au/Bi-Ce O ₂ Nanobastões (Polimorfos)	Álcool Benzílico → Benzaldeído	Tolueno, O ₂ (atm), 110 °C (383 K)	CeO ₂ : Nanobastões (plano (110) exposto). Bi induz defeitos de rede do tipo Frenkel (intersticiais) nos nanobastões, aumentando a redutibilidade.	Defeitos de Rede e Mobilidade de O: A alta concentração de defeitos Frenkel nos nanobastões dopados com Bi facilita o transporte de oxigênio, resultando em atividade superior.	TOF: 105 h ⁻¹ (Nanobastões Bi-dopados). Conversão: 90%; Seletividade: 85% (3.5 wt% Au).
Pakriev <i>et al.</i> (2020)	Investigar a eficiência de Au/TiO ₂ modificado com CeO ₂ ou La ₂ O ₃ na oxidação de 1-feniletanol, comparando oxidantes (TBHP e O ₂) e elucidando a natureza dos sítios ativos.	Au/CeO ₂ /TiO ₂ (Modificado)	1-Feniletanol → Acetofenona	Mesitileno /Livre de Solv., O ₂ ou TBHP, 80 °C	CeO ₂ : Modificador de suporte (TiO ₂) que melhora a atividade na oxidação aeróbica (especialmente com baixo teor de Au).	Sítios Au Catiônicos: Au ⁺ ou Au ^{δ+} são os sítios ativos. A modificação com CeO ₂ confere desempenho superior ao AuTiO ₂ puro.	Rendimento: 100% (Oxidação TBHP em 3 h, ou Oxidação O ₂ em 3 h para 0.5% Au).
Qi <i>et al.</i> (2022)	Aliviar o envenenamento superficial do Pd (pela adsorção de produto) na oxidação de glicose,	Pd/Red-CeO ₂ (CeO ₂ pré-reduzida)	Glicose → Ácido Glucônico	Aquosa (Na ₂ CO ₃), O ₂ (atm), 25 °C	CeO ₂ (Rica em O _v): Modula a estrutura eletrônica do Pd (downshift d-band).	Mecanismo Anti-Envenenamento: A interação Pd-CeO ₂ enfraquece a adsorção do	TOF inicial: 186 h ⁻¹ (2x o Pd/CeO ₂ não-reduzido). Conversão: 69.9%; Seletividade: 100%.

Caminhos da Pesquisa Multidisciplinar

	utilizando Pd/CeO ₂ rica em vacâncias de oxigênio, visando alta atividade e durabilidade.					produto (anti-envenenamento). O _v aumenta Pd–O–Ce e gera espécies OHads ativas.
Wang et al. (2022)	Sintetizar clusters de Pd/CeO ₂ via ALD com alta e estável razão Pd ²⁺ /(Pd ⁰ + Pd ²⁺) para ultra-alta atividade e elucidar o papel sinérgico dos sítios duplos (Pd ⁰ /Pd ²⁺) e do oxigênio ativo.	20Pd/CeO ₂ (Clusters por ALD)	Álcool Benzílico → Benzaldeído	Livre de solvente, 0.3 MPa O ₂ , 120 °C	CeO ₂ (Nanobastões): Interação Pd–CeO ₂ previne a redução completa, mantendo a razão Pd ²⁺ /(Pd ⁰ + Pd ²⁺) estável (60.8%).	Mecanismo de Sítios Duplos Pd ⁰ /Pd ²⁺ : Pd ²⁺ adsorve o álcool. A atividade é controlada pela razão Pd ²⁺ /(Pd ⁰ +Pd ²⁺) e pela concentração de oxigênio ativo (O _α). TOF máximo: 3.50×10 ⁵ h ⁻¹ (ultra-alta). Conversão: 90.0%; Seletividade: 94.5%.
Lei et al. (2023)	Investigar a relação estrutura-atividade, preparando nanofolhas de CeO ₂ dopadas com Ti para variar a concentração de vacâncias de oxigênio (O _v). Carregar Pd para avaliar a performance na oxidação de álcool benzílico e elucidar o papel dos sítios interfaciais Pd–O–Ce.	Pd/N-Ti(12%)CeO ₂ (Nanofolhas Dopadas com Ti)	Álcool Benzílico → Benzaldeído	Água, 0.5 MPa O ₂ , 90 °C	CeO ₂ (Nanofolhas): Dopagem com Ti aumenta área superficial e, sobretudo, a concentração de vacâncias de oxigênio (Ce ³⁺).	Sítios Interfaciais Pd ²⁺ Ativos: Correlação linear positiva entre Ce ³⁺ (vacâncias) e Pd ²⁺ superficial. O sítio Pd–O–Ce é o principal catalítico. TOF: 485 h ⁻¹ . Conversão: 98.6%; Seletividade: 98.4%. Ea: 20.4 kJ/mol.
Kulkarni et al. (2024)	Desenvolver um novo Au–Pd@CeO ₂ bimetalico verde (extrato de aloe vera) para acoplamento cruzado e aminação de	Au–Pd@CeO ₂ (Bimetalico)	Álcool Benzílico → Imida (Aminação)	Livre de solvente, 150 °C	CeO ₂ : Suporte estável que oferece propriedades de armazenamento/difusão de oxigênio (Ce ⁴⁺ /Ce ³⁺).	Sinergia Au–Pd–CeO ₂ : CeO ₂ auxilia na oxidação inicial do álcool a benzaldeído; a liga Au–Pd catalisa a desidrogenação. Rendimento de aminação: 95%.

Caminhos da Pesquisa Multidisciplinar

álcool benzílico.			ão subsequente.				
Suryam a et al. (2025)	Desenvolver Pd/CeO ₂ para oxidação aeróbica seletiva de álcool benzílico livre de solvente, buscando otimizar a carga de Pd e a reciclabilidade.	3Pd/CeO ₂ (PdNPs 5 nm)	Álcool Benzílico → Benzaldeído	Livre de solvente, O ₂ (atm), 90 °C	CeO ₂ : Induz a redutibilidade da céria, aumentando a concentração superficial de Ce ³⁺ (19.2% vs. 10.1% na CeO ₂ pura).	Forte Interação Metal-Suporte (SMSI-like): Aumento de O _v e presença coexistente de Pd ⁰ e PdOx na superfície.	Conversão: 95%; Seletividade: 99%. 9.5x mais ativo que CeO ₂ pura.

Fonte: Autores, 2025

A análise da revisão de escopo sobre catalisadores Au/CeO₂, Pd/CeO₂ e bimetálicos na oxidação aeróbica de alcoóis revela padrões de design, desempenho e lacunas metodológicas cruciais. O álcool benzílico é o substrato predominante, servindo como modelo primário em estudos como os de Kong *et al.* (2016), Santra *et al.* (2016a), e Wang *et al.* (2022). Substratos mais complexos, como os modelos de lignina (PP-ol) investigados por Deng *et al.* (2015) e Song *et al.* (2019), ou alcoóis secundários (Pakrieva *et al.*, 2020), demonstram a versatilidade, enquanto o foco na glicose (Qi *et al.*, 2022) aponta para aplicações em biomassa. As condições reacionais recorrentes, caracterizadas pelo uso de oxigênio molecular (O₂) sob temperaturas moderadas (90 °C a 120 °C), confirmam a busca pela sustentabilidade industrial. As métricas de desempenho reportam consistentemente alta seletividade para o aldeído/cetona, sendo a Frequência de *Turnover* (TOF) a principal métrica de atividade, e a estabilidade do catalisador, medida em ciclos de reuso, é frequentemente atribuída à forte ancoragem do metal pela CeO₂.

O comportamento catalítico diverge significativamente entre os metais. O Paládio (Pd) destaca-se pelo desempenho ultra-alto, com os TOFs mais elevados relatados, como 6739 h⁻¹ para átomos isolados Pd₁/CeO₂ (Xin *et al.*, 2018) e impressionantes 3,50 × 10⁵ h⁻¹ para clusters precisos obtidos via ALD (Wang *et al.*, 2022). Essa atividade é maximizada pela dispersão atômica e pela forte interação metal-suporte, que estabiliza as espécies ativas. No entanto, há uma inconsistência sobre a espécie ativa, com alguns estudos favorecendo o Pd⁰ (Hu *et al.*, 2019) e outros correlacionando a atividade com o Pd²⁺ ou sítios duplos (Pd⁰/Pd²⁺) na interface (Lei *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2022). Em contraste, o Ouro (Au) demonstra boa atividade, ligada principalmente a espécies catiônicas de baixo número de coordenação (Au^{□+}), cuja estabilidade é mantida por dopantes como Bi (Santra *et al.*, 2016b). O Au é particularmente eficiente em reações que envolvem a formação de espécies reativas de oxigênio, como o ânion radical superóxido (O₂⁻), crucial na clivagem de PP-ol (Song *et al.*, 2019) e em processos de fotocatalise plasmônica (Li *et al.*, 2017). As abordagens bimetálicas Au-Pd (Kulkarni *et al.*, 2024), embora menos exploradas na tabela em

comparação direta, sugerem uma sinergia eletrônica que otimiza a oxidação inicial do álcool antes de catalisar reações subsequentes, como a aminação.

O papel do suporte CeO_2 é crucial. A CeO_2 atua como um transdutor redox, facilitando a ativação do O_2 molecular e a regeneração do sítio metálico através de seu ciclo $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$. A chave para essa funcionalidade reside nas vacâncias de oxigênio (O_v), cuja concentração é estrategicamente controlada. O aumento das O_v (indicado por Ce^{3+}) é diretamente correlacionado com a atividade catalítica em diversos estudos, seja por pré-redução (Red- CeO_2) (Qi *et al.*, 2022) ou por dopagem. Dopantes como Ti (Lei *et al.*, 2023) e Bi (Keshri *et al.*, 2020) aumentam a concentração de O_v e induzem defeitos de rede, como os defeitos de Frenkel, potencializando o transporte de oxigênio e a redutibilidade do sistema. A morfologia da CeO_2 , como nanobastões que expõem planos de alta energia (Lei *et al.*, 2019) ou mesoestruturas (Lolli *et al.*, 2016), é empregada para maximizar o número de sítios interfaciais ativos (metal–O–Ce).

Tendências tecnológicas notáveis permeiam os dados. O foco em partículas pequenas culminou na exploração da Catálise de Átomo Único (SAC), como demonstrado pela atividade recorde do Pd_1/CeO_2 (Xin *et al.*, 2018). Além disso, a busca pelo controle da distribuição atômica levou à utilização de técnicas de engenharia de superfície de ponta, como a Deposição de Camada Atômica (ALD), que permitiu o controle preciso da razão $\text{Pd}^{2+}/\text{Pd}^0$ (Wang *et al.*, 2022). Estratégias de engenharia de materiais avançadas, como estruturas magnéticas *core-shell* ($\text{Pd}/\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{mCeO}_2$) (Kong *et al.*, 2016) e nanocompósitos ternários ($\text{Au}/\text{CeO}_2@\text{g-C}_3\text{N}_4$) (Kohantorabi *et al.*, 2018), também indicam a evolução do campo.

Por fim, a análise crítica revela lacunas e inconsistências. A dependência excessiva do álcool benzílico cria uma lacuna de substratos para alcoóis alifáticos mais desafiadores. Além disso, a falta de padronização experimental (diferentes solventes, pressões e temperaturas) impede a comparação rigorosa e universal dos valores de TOF. A variabilidade nos métodos de síntese (impregnação, deposição-precipitação, ALD) contribui para a inconsistência mecanística do Pd, dificultando a definição de um único sítio ativo ótimo.

3.3 ANÁLISE CRÍTICA E SÍNTESE DE EVIDÊNCIAS: RELAÇÃO ESTRUTURA–PROPRIEDADE–ATIVIDADE, PROPOSIÇÕES MECANÍSTICAS EM CATALISADORES AU, PD E AU–PD/ CeO_2 E TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS RECENTES

A oxidação seletiva de alcoóis a aldeídos ou cetonas constitui uma transformação orgânica fundamental, com vastas aplicações industriais (Hu *et al.*, 2019). A transição para sistemas catalíticos heterogêneos que empregam oxigênio molecular (O_2) ou ar como oxidantes limpos e baratos, preferencialmente sob condições isentas de solvente, é uma tendência motivada por imperativos ambientais e econômicos, sendo considerada uma estratégia de Química Verde (Lei *et al.*, 2023).

Comportamento de Au/CeO₂, Pd/CeO₂ e Au–Pd/CeO₂

O CeO₂ é universalmente reconhecido como um suporte cataliticamente ativo para reações de oxidação, devido à sua capacidade única de alternar entre os estados Ce⁴⁺ e Ce³⁺, facilitando o ciclo redox e a capacidade de armazenamento e liberação de oxigênio (Lolli *et al.*, 2016; Suryam *et al.*, 2025).

Os catalisadores à base de Pd geram considerável interesse por alcançarem simultaneamente alta atividade e excelente seletividade (Hu *et al.*, 2019). Wang *et al.* (2022) sintetizaram aglomerados de Pd em CeO₂ que exibiram atividade ultrarrápida, alcançando um TOF de $3,50 \times 10^5 \text{ h}^{-1}$ na oxidação aeróbica de álcool benzílico. Deng *et al.* (2015) observaram que o catalisador Pd/CeO₂ exibiu uma conversão superior de 2-fenoxi-1-feniletanol (64%) em comparação com suportes como Al₂O₃ (34%) e SiO₂ (10%). Suryam *et al.* (2025) observaram que o catalisador 3Pd/CeO₂ atingiu uma conversão de 95% do álcool benzílico com seletividade de 99% para o benzaldeído, sendo 9,5 vezes mais ativo que o CeO₂ puro. Hu *et al.* (2019) prepararam o compósito ternário Pd/CeO₂-graphene dopado com nitrogênio (NG), que apresentou uma atividade significativamente superior (TOF de $30,74 \text{ s}^{-1}$) comparado aos seus análogos binários (Pd/NG e Pd/CeO₂), confirmando o efeito sinérgico entre os três componentes.

Estes sistemas também demonstram alta seletividade (>94%) para aldeídos (Lei *et al.*, 2019; Santra *et al.*, 2016a). Li *et al.* (2017) sintetizaram nanofibras híbridas Au/CeO₂ por eletrofiação e observaram 100% de seletividade para benzaldeído na oxidação de álcool benzílico sob luz visível ou simulada. Santra *et al.* (2016a) prepararam Au em CeO₂ dopado com Bi (Au/Bi–CeO₂) e obtiveram alta seletividade (>99%) para benzaldeído, com conversão de 60%. Keshri *et al.* (2020) demonstraram que os nanobastões Au/Bi–CeO₂ atingiram 90% de conversão e 85% de seletividade. Lei *et al.* (2019) evidenciaram que a atividade está inversamente relacionada ao tamanho da partícula de Au, sendo os átomos únicos (Au–SA/CeO₂–NR) os mais ativos, com TOF cerca de 4 vezes superior ao de nanopartículas (Au–NP/CeO₂–NR).

A incorporação de ambos os metais visa o efeito sinérgico. Kulkarni *et al.* (2024) sintetizaram o Au–Pd@CeO₂ nanocompósito usando extrato de *aloe vera*, verificando que os bimetálicos Au e Pd suportados em CeO₂ apresentam um efeito sinérgico para transformações orgânicas.

Fatores que afetam Seletividade, Conversão, Estabilidade e Atividade

A atividade é inversamente proporcional ao tamanho da partícula (Lei *et al.*, 2019). Hu *et al.* (2019) observaram que o CeO₂ melhorou drasticamente a dispersão das nanopartículas de Pd, reduzindo seu tamanho médio de 10,7 nm (em Pd/NG) para 7,5 nm (em Pd/5CeO₂–NG). Lei *et al.* (2019) demonstraram que a atividade (TOF) do Au/CeO₂ era 4 vezes maior para os átomos isolados (Au–SA) do que para as nanopartículas (Au–NP).

Uma Interação Metal–Suporte (IMS) forte é essencial, pois previne a agregação e a lixiviação do metal, garantindo a estabilidade e a manutenção da alta dispersão (Hu *et al.*, 2019). Qi *et al.* (2022)

confirmaram que a IMS modula a estrutura eletrônica do Pd, o que confere resistência superior ao envenenamento por produtos adsorvidos.

A concentração de Vacâncias de Oxigênio (V_O) na superfície do CeO_2 é diretamente correlacionada com a atividade. Lei *et al.* (2023) observaram uma correlação positiva entre a concentração de Ce^{3+} (associada a V_O) e o TOF.

A integração do CeO_2 promove estabilidade. Hu *et al.* (2019) demonstraram que o $Pd/5CeO_2$ -NG manteve sua atividade e seletividade após 6 ciclos. Kulkarni *et al.* (2024) também observaram excelente reusabilidade para o $Au-Pd@CeO_2$ por até sete ciclos sem alteração substancial na atividade.

3.3.1 Tendências tecnológicas recentes

A engenharia de materiais catalíticos avançados foca no controle estrutural em escala nanométrica para otimizar a atividade e a estabilidade.

Controle de Facetas, Vacâncias, Tamanho de Partícula e Sinergia

A morfologia do CeO_2 determina os planos cristalográficos expostos, influenciando a concentração de V_O (Keshri *et al.*, 2020). Wang *et al.* (2022) utilizaram nanobastões de CeO_2 que exibiam predominantemente facetas (111) proeminentes. Keshri *et al.* (2020) compararam nanobastões (com facetas 110/100 expostas) e nanocubos (100 predominante), indicando que os defeitos de rede variam drasticamente entre as morfologias.

A introdução de dopantes é uma estratégia para modular a densidade de V_O . Keshri *et al.* (2020) demonstraram que o dopante Bi^{3+} nos nanobastões de CeO_2 induziu a formação de defeitos de rede tipo Frenkel, promovendo maior mobilidade e ativação de oxigênio. Santra *et al.* (2016a) mostraram que a incorporação de Sn^{4+} no CeO_2 também levou à formação de vacâncias de óxido, melhorando a atividade do Au. Lei *et al.* (2023) aplicaram doping com Ti em nanofolhas de CeO_2 para aumentar o teor de V_O e Ce^{3+} , o que resultou em melhor desempenho catalítico.

A utilização atômica máxima é alcançada com sítios isolados. Xin *et al.* (2018) sintetizaram Pd monoatômico (Pd_1/CeO_2) e aglomerados de Pd_6/CeO_2 e verificaram que o Pd_1/CeO_2 era altamente ativo ($TOF=6739\ h^{-1}$), enquanto o Pd_6/CeO_2 era inerte, comprovando que o átomo único de Pd é a espécie ativa para a oxidação aeróbica de álcoois benzílicos. Lei *et al.* (2019) confirmaram uma tendência semelhante para o Au, onde os átomos isolados de Au ($Au-SA$) apresentaram um TOF superior.

A sinergia em sistemas ternários ($Au-Pd$) foi avaliada por Kulkarni *et al.* (2024), que destacaram que a liga bimetálica $Au-Pd$ em CeO_2 exibe um efeito sinérgico para transformações orgânicas, sendo crucial para a atividade e estabilidade. Além disso, sugeriram que o Au, sendo mais eletronegativo que o Pd, gera espécies de Pd com baixa densidade eletrônica, o que melhora a reatividade do Pd na forma de liga $Au-Pd$.

3.3.2 Interação metal–suporte

A estrutura eletrônica na interface metal–CeO₂ (IMS) é o fator dominante que rege a atividade catalítica.

Evidências para Au⁰/Au⁺, Pd⁰/Pd²⁺, Transferência Eletrônica, Ce³⁺/Ce⁴⁺ e Vacâncias

O ótimo desempenho frequentemente envolve uma proporção específica de espécies de Pd. Wang *et al.* (2022) observaram que a razão Pd²⁺/(Pd⁰ + Pd²⁺) é criticamente importante para a atividade, exibindo uma relação tipo vulcão e estabilizando a razão Pd²⁺ no 20Pd/CeO₂ em 60.8% após a reação. Lei *et al.* (2023) estabeleceram que a proporção de Pd²⁺ no catalisador Pd/N–Ti(12%)CeO₂ era a mais alta (82%), e esta proporção mostrou uma correlação linear positiva com o TOF. Hu *et al.* (2019) notaram que o CeO₂ suprimiu a formação de óxido de Pd e aumentou a fração de Pd⁰ devido à interação eletrônica.

Para os catalisadores de Au, as espécies catiônicas, como Au⁺ ou Au³⁺, são frequentemente as mais ativas. Lei *et al.* (2019) confirmaram que as espécies de Au no Au–SA/CeO₂–NR eram 100% catiônicas, contrastando com a dominância de Au⁰ (88%) no Au–NP/CeO₂–NR. Pakrieva *et al.* (2020) concluíram que a desativação do catalisador Au/CeO₂/TiO₂ está ligada à redução dos estados Au⁺(Au^{δ+}), confirmando a natureza catiônica dos sítios ativos. Santra *et al.* (2016b) observaram, via XPS (Espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X), que o Au/Bi–CeO₂ continha espécies Au⁰ e Au³⁺.

A IMS induz a transferência de elétrons, o que é refletido pela concentração de Ce³⁺. Suryam *et al.* (2025) mostraram que o teor de Ce³⁺ aumentou de 10,1% em CeO₂ puro para 19,2% em 3Pd/CeO₂, indicando a redutibilidade induzida pela incorporação do Pd. Lei *et al.* (2023) correlacionaram o aumento da concentração de Ce³⁺ com o aumento da proporção de Pd²⁺, o que sugere a formação de uma interface de interação mais pronunciada (Pd–O–Ce). Qi *et al.* (2022) observaram que o CeO₂ com vacâncias promove a transferência eletrônica, resultando em um deslocamento para baixo do centro da banda d do Pd, o que enfraquece a adsorção de produtos indesejados e confere resistência ao envenenamento.

3.3.3 Discussão temática mecanística e química

3.3.3.1 Mecanismos

O mecanismo de oxidação sobre Pd/CeO₂ envolve a participação dual das espécies Pd⁰ e Pd²⁺. Wang *et al.* (2022) sugeriram que o sítio duplo Pd⁰ + Pd²⁺ é crucial para o mecanismo de eliminação de β-hidreto promovido por oxigênio, sendo a quebra da ligação Pd–O envolvida na etapa limitante da velocidade. Para Au/CeO₂, o mecanismo envolve a ativação do álcool nos sítios de vacâncias de oxigênio e a subsequente catálise pelo Au⁺.

A eliminação de β-hidreto é a etapa chave. Wang *et al.* (2022) identificaram essa etapa como a etapa limitante da velocidade na oxidação aeróbica de álcool benzílico sobre Pd/CeO₂. Lei *et al.* (2019)

propuseram que as espécies catiônicas $\text{Au}^{3+}/\text{Au}^+$ adjacentes no sítio interfacial $[\text{O}-\text{V}_\text{O}-\text{Ce}-\text{O}-\text{Au}]$ são as responsáveis por promover a eliminação do β -hidreto no intermediário alcóxido.

O CeO_2 facilita a ativação do O_2 . Song *et al.* (2019) verificaram que o Au/CeO_2 ativa o oxigênio para formar o ânion radical superóxido ($\text{O}_2^{\cdot-}$), que tem um papel vital. Qi *et al.* (2022) mostraram que o CeO_2 rico em vacâncias também promove a dissociação da H_2O para gerar espécies ativas $\cdot\text{OH}$, que ajudam na oxidação. Xin *et al.* (2018) sugeriram que a presença de vacâncias de oxigênio facilita as interações entre os grupos hidroxila e o CeO_2 , um passo inicial para a oxidação.

As vacâncias de oxigênio (V_O) em CeO_2 são multifuncionais. Lei *et al.* (2019) propuseram que os V_O facilitam a adsorção do álcool e a dissociação da ligação $\text{O}-\text{H}$, enquanto os sítios Au adjacentes eliminam o β -hidreto.

O substrato influencia a reatividade. Lei *et al.* (2019) observaram que o $\text{Au}-\text{SA}/\text{CeO}_2-\text{NR}$ era mais ativo para álcoois benzílicos substituídos do que para álcoois alifáticos, embora ambos tenham sido oxidados. Pakrieva *et al.* (2020) compararam a oxidação de 1-feniletanol (benzílico) com 1-octanol (alifático) e, embora os detalhes cinéticos e de conversão fossem diferentes, concluíram que a natureza dos sítios ativos (Au^+) permanece a mesma para ambos os processos de oxidação aeróbica.

3.3.3.2 Papel do CeO_2

A exposição controlada das facetas é um alvo da nanotecnologia. Keshri *et al.* (2020) estudaram morfologias de CeO_2 (nanobastões e nanocubos) e concluíram que as diferenças nas facetas expostas ((110) e (100)) levam a concentrações relativas distintas de vacâncias de oxigênio e defeitos de rede.

A densidade de V_O , quantificada pelo teor de Ce^{3+} , é diretamente correlacionada com a atividade. Lei *et al.* (2023) observaram que a maior concentração de Ce^{3+} no $\text{Pd}/\text{N}-\text{Ti}(12\%)\text{CeO}_2$ foi associada ao aumento de Pd^{2+} e maior TOF. Qi *et al.* (2022) demonstraram que a concentração de V_O no $\text{Pd}/\text{Red}-\text{CeO}_2$ (reduzido com H_2) foi maior do que no Pd/CeO_2 não reduzido, o que aumentou a densidade eletrônica do Pd e, consequentemente, a atividade catalítica.

O doping com bismuto (Bi^{3+}) em CeO_2 , conforme observado por Santra *et al.* (2016) e Keshri *et al.* (2020), e com titânio (Ti) por Lei *et al.* (2023), cria defeitos e otimiza a formação de V_O para manter a neutralidade de carga, aumentando a mobilidade do oxigênio e a atividade.

3.3.3.3 Comparação entre Au , Pd e $\text{Au}-\text{Pd}$

O Pd/CeO_2 se destaca, especialmente na forma de átomo único (Pd_1/CeO_2), que Xin *et al.* (2018) reportaram ter um TOF de 6739 h^{-1} . Contudo, a atividade do Au/CeO_2 também é extremamente alta, especialmente na forma de átomo único ($\text{Au}-\text{SA}$), superando os análogos de nanopartículas, conforme Lei *et al.* (2019).

A alta seletividade (>94–99%) para aldeídos é uma característica comum a todos os sistemas suportados em CeO₂, sejam eles monometálicos (Au/CeO₂, Pd/CeO₂) ou bimetálicos (Au–Pd@CeO₂).

A IMS forte provida pelo CeO₂ é crucial para a estabilidade. Wang *et al.* (2022) observaram que a interação Pd–CeO₂ manteve a razão Pd²⁺/(Pd⁰ + Pd²⁺) estável após a reação. Kulkarni *et al.* (2024) observaram a alta reciclabilidade do Au–Pd@CeO₂.

A superioridade do sistema bimetálico Au–Pd suportado em CeO₂ reside na capacidade de combinar efeitos eletrônicos e sinergias de sítios ativos. Kulkarni *et al.* (2024) evidenciaram que o Au (mais eletronegativo) modula a reatividade do Pd na liga Au–Pd por transferência eletrônica, gerando espécies de Pd com baixa densidade eletrônica. Embora as fontes fornecidas não comparem diretamente o Au–Pd/CeO₂ com os monometálicos Au/CeO₂ e Pd/CeO₂ sob exatamente as mesmas condições de oxidação aeróbica de álcoois, o efeito sinérgico da liga Au–Pd suportada em CeO₂ é crucial para o seu desempenho, estabilidade e reciclabilidade.

4 CONCLUSÃO

A Revisão de Escopo revelou que a catálise Au, Pd e Au-Pd suportada em CeO₂ para a oxidação aeróbica de álcoois é um campo de pesquisa de interesse contínuo e estratégico na última década. A densidade de publicações, com picos notáveis em 2016, 2019 e 2020, valida a relevância do tema para a Química Verde, utilizando O₂ como oxidante primário. Em termos de métricas, a pesquisa transicionou decisivamente para a quantificação da atividade intrínseca, com a Frequência de Rotação (TOF) emergindo como o principal parâmetro de comparação. O corpo de evidências mapeado demonstrou um alto nível de rigor metodológico e analítico, com o foco principal na relação estrutura–propriedade, o que permitiu a esta Revisão sintetizar padrões robustos.

O padrão central de alto desempenho reside na natureza interfacial e multifuncional dos catalisadores, criticamente dependente da Interação Metal–Suporte (IMS). A IMS é o fator que rege a atividade: ela estabiliza espécies ativas (Au^{□+} ou Pd²⁺) e explora a capacidade redox do CeO₂ (Ce⁴⁺/Ce³⁺), promovendo a geração de vacâncias de oxigênio (V_O) essenciais para a ativação do O₂. A fronteira tecnológica, demonstrada pela alta eficiência de átomos únicos de Au e Pd (que atingem o TOF máximo), confirma que o sítio catalítico isolado é intrinsecamente superior na oxidação aeróbica. No entanto, a totalidade da literatura mapeada não oferece soluções conclusivas para a otimização em escala, evidenciando lacunas claras.

Persiste uma necessidade evidente de pesquisas futuras para transpor as barreiras tecnológicas e de compreensão mecanística. A principal lacuna quantitativa reside na falta de correlações conclusivas entre a morfologia controlada do CeO₂ (facetas específicas, dopagem) e o desempenho catalítico final, especialmente em termos de estabilidade térmica a longo prazo. Além disso, há uma limitação na

generalização dos resultados devido à predominância do álcool benzílico como substrato modelo, com pouca representatividade de álcoois alifáticos (como o 1-octanol) e álcoois secundários (como o 1-feniletanol) nas métricas de desempenho catalítico. Futuros estudos devem priorizar o desenvolvimento de metodologias de síntese escaláveis e robustas para estabilizar espécies atômicas isoladas e nanoaglomerados bimetálicos Au–Pd. O objetivo deve ser otimizar o efeito sinérgico para superar o TOF de monometálicos, ao mesmo tempo em que se garante a resistência à sinterização e à lixiviação, preenchendo assim a lacuna entre o desempenho de laboratório e a aplicação industrial.

REFERÊNCIAS

- AKINSANYA, Oluwatofunmi O. *et al.* Understanding the promotional role of Pd in oxidative alcohol coupling reactions over dilute PdAu alloys. *Journal of Catalysis*, v. 443, p. 115942, 1 mar. 2025.
- ANASTAS, Paul T.; HEINE, Lauren G.; WILLIAMSON, Tracy C. *Green Chemical Syntheses and Processes: Introduction*. p. 1–6, 15 ago. 2000.
- ANASTAS, Paul T.; KIRCHHOFF, Mary M. Origins, Current Status, and Future Challenges of Green Chemistry†. *Accounts of Chemical Research*, v. 35, n. 9, p. 686–694, set. 2002.
- BAI, Peng *et al.* Remarkably improved performance of Au-Pd/ γ -Al₂O₃ catalyst in benzyl alcohol oxidation by mercapto-propyl-trimethoxysilane modification. *Catalysis Today*, v. 405–406, p. 182–192, 1 dez. 2022.
- CHOUDHARY, Vasant R. *et al.* A green process for chlorine-free benzaldehyde from the solvent-free oxidation of benzyl alcohol with molecular oxygen over a supported nano-size gold catalyst. *Green Chemistry*, v. 7, n. 11, p. 768–770, 21 out. 2005.
- COHEN, Jacob. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, v. 20, n. 1, p. 37–46, 1960.
- DENG, Weiping *et al.* Oxidative conversion of lignin and lignin model compounds catalyzed by CeO₂-supported Pd nanoparticles. *Green Chemistry*, v. 17, n. 11, p. 5009–5018, 2 nov. 2015.
- FENG, Meng *et al.* Solvent-free and efficiently selective oxidation of benzyl alcohol catalyzed by Pd/CeO₂ materials under atmospheric oxygen. *Applied Catalysis A: General*, v. 665, p. 119384, 5 set. 2023.
- GUO, Zhen *et al.* Recent advances in heterogeneous selective oxidation catalysis for sustainable chemistry. *Chemical Society Reviews*, v. 43, n. 10, p. 3480–3524, 22 abr. 2014.
- HARUTA, M. *et al.* Novel Gold Catalysts for the Oxidation of Carbon Monoxide at a Temperature far Below 0 °C. *Chemistry Letters*, v. 16, n. 2, p. 405–408, 1987.
- HU, Zonggao *et al.* Preparation of ternary Pd/CeO₂-nitrogen doped graphene composites as recyclable catalysts for solvent-free aerobic oxidation of benzyl alcohol. *Applied Surface Science*, v. 471, p. 852–861, 31 mar. 2019.
- KANAKIKODI, Kempanna S. *et al.* Effect of morphology and their oxygen vacancies of nanostructured CeO₂ catalyst for carboxymethylation of biomass-derived alcohols. *Molecular Catalysis*, v. 552, p. 113667, 1 jan. 2024.
- KESHRI, Kumer Saurav *et al.* Role of bismuth on aerobic benzyl alcohol oxidation over ceria polymorph-supported gold nanoparticles. *Catalysis Communications*, v. 140, p. 106004, 5 jun. 2020.
- KOHANTORABI, Mona *et al.* Fabrication of novel ternary Au/CeO₂@g-C₃N₄ nanocomposite: kinetics and mechanism investigation of 4-nitrophenol reduction, and benzyl alcohol oxidation. *Applied Physics A* 2018 124:6, v. 124, n. 6, p. 441–, 22 maio 2018.
- KONG, Liping *et al.* Magnetic Core–Shell Nanostructured Palladium Catalysts for Green Oxidation of Benzyl Alcohol. *Catalysis Letters* 2016 146:7, v. 146, n. 7, p. 1321–1330, 9 maio 2016.

KULKARNI, Padmakar A. *et al.* Synthesis of Au–Pd@CeO₂ nanocomposite as a potential catalyst for the Buchwald–Hartwig cross-coupling and amination of benzyl alcohol reactions. *Journal of Chemical Sciences* 2024 136:2, v. 136, n. 2, p. 40–, 24 maio 2024.

LANDIS, J. Richard; KOCH, Gary G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, v. 33, n. 1, p. 159, mar. 1977.

LEI, Li-jun *et al.* Ti doped CeO₂ nanosheets supported Pd catalyst for alcohol oxidation: Catalysis of interfacial sites. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, v. 51, n. 7, p. 1007–1017, 1 jul. 2023.

LEI, Lijun *et al.* Aerobic Oxidation of Alcohols over Isolated Single Au Atoms Supported on CeO₂ Nanorods: Catalysis of Interfacial [O–Ov–Ce–O–Au] Sites. *ACS Applied Nano Materials*, v. 2, n. 8, p. 5214–5223, 23 ago. 2019.

LI, Benxia *et al.* Optimization of plasmon-induced photocatalysis in electrospun Au/CeO₂ hybrid nanofibers for selective oxidation of benzyl alcohol. *Journal of Catalysis*, v. 348, p. 256–264, 1 abr. 2017.

LI, Xiaoliang *et al.* Investigations of supported Au–Pd nanoparticles on synthesized CeO₂ with different morphologies and application in solvent-free benzyl alcohol oxidation. *Applied Surface Science*, v. 505, p. 144473, 1 mar. 2020.

LIN, Peng *et al.* One-pot synthesis of finely-dispersed Au nanoparticles on ZnO hexagonal sheets for base-free aerobic oxidation of vanillyl alcohol. *Catalysis Science & Technology*, v. 12, n. 14, p. 4613–4623, 18 jul. 2022.

LOLLI, Alice *et al.* Hard-template preparation of Au/CeO₂ mesostructured catalysts and their activity for the selective oxidation of 5-hydroxymethylfurfural to 2,5-furandicarboxylic acid. *Microporous and Mesoporous Materials*, v. 226, p. 466–475, 15 maio 2016.

PAKRIEVA, Ekaterina *et al.* Supported Gold Nanoparticles as Catalysts in Peroxidative and Aerobic Oxidation of 1-Phenylethanol under Mild Conditions. *Nanomaterials* 2020, Vol. 10, Page 151, v. 10, n. 1, p. 151, 15 jan. 2020.

PETERS, Micah D. J. *et al.* Guidance for conducting systematic scoping reviews. *International Journal of Evidence-Based Healthcare*, v. 13, n. 3, p. 141–146, 1 set. 2015.

QI, Xingyue *et al.* Suppressing catalyst deactivation on Pd/CeO₂ for selective oxidation of glucose into gluconic acid. *Journal of Catalysis*, v. 414, p. 44–52, 1 out. 2022.

RAN, Longqiao *et al.* Facile synthesis of gold/palladium hydride heterostructures for efficient ethanol oxidation. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 60, p. 548–555, 22 mar. 2024.

REN, Xuehai *et al.* Engineered fabrication of ZnS/ZIS hierarchical tubular heterojunction from upcycled PET for photocatalytic co-production of benzaldehyde and H₂O₂ via selective benzyl alcohol oxidation. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 1042, p. 183786, 15 out. 2025.

SANTRA, Chiranjit *et al.* Gold nanoparticles on mesoporous Cerium-Tin mixed oxide for aerobic oxidation of benzyl alcohol. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, v. 418–419, p. 41–53, 1 jul. 2016a.

SANTRA, Chiranjit; AUROUX, Aline; CHOWDHURY, Biswajit. Bi doped CeO₂ oxide supported gold nanoparticle catalysts for the aerobic oxidation of alcohols. *RSC Advances*, v. 6, n. 51, p. 45330–45342, 9 maio 2016b.

SHI, Zongbo *et al.* Au supported on γ -AlOOH and γ -Al₂O₃ for low temperature oxidation of CO and aromatic alcohols. *RSC Advances*, v. 15, n. 10, p. 7563–7570, 28 mar. 2025.

SONG, Wu Lin *et al.* Activating molecular oxygen with Au/CeO₂ for the conversion of lignin model compounds and organosolv lignin. *RSC Advances*, v. 9, n. 53, p. 31070–31077, 26 set. 2019.

SU, Yang *et al.* Surface hydrogen bonds assisted meso-porous WO₃ photocatalysts for high selective oxidation of benzylalcohol to benzylaldehyde. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 217, p. 108–114, 15 nov. 2017.

SURYAM, N. *et al.* Selective Oxidation of Benzyl Alcohol to Benzaldehyde under Solvent Free Aerobic Oxidation Condition Using Pd-Supported CeO₂ Catalyst. *Russian Journal of General Chemistry* 2025 95:5, v. 95, n. 5, p. 1270–1279, 21 maio 2025.

TRICCO, Andrea C. *et al.* PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>, v. 169, n. 7, p. 467–473, 4 set. 2018.

WANG, Zhe *et al.* Dual Pd²⁺ and Pd⁰ sites on CeO₂ for benzyl alcohol selective oxidation. *Journal of Catalysis*, v. 414, p. 385–393, 1 out. 2022.

XIN, Pingyu *et al.* Revealing the Active Species for Aerobic Alcohol Oxidation by Using Uniform Supported Palladium Catalysts. *Angewandte Chemie*, v. 130, n. 17, p. 4732–4736, 16 abr. 2018.

YANG, Shuai *et al.* Selective oxidation of aryl alcohols to aldehydes/ketones on Pd/Co₃O₄-bimetallic catalysts. *Applied Catalysis A: General*, v. 710, p. 120699, 25 jan. 2026.

YU, Zhendong *et al.* Boosting the selective hydrogenation of renewable unsaturated aldehydes to alcohols over CeO₂ with different morphology. *Chemical Engineering Journal*, v. 513, p. 162803, 1 jun. 2025.

ZHANG, Bingzhen *et al.* Highly dispersed Cu on hollow spherical CeO₂: An efficient and stable catalyst for the RWGS reaction. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, v. 366, p. 125003, 5 jun. 2025.

O USO DE CÉLULAS-TRONCO EM TERAPIAS VETERINÁRIAS REGENERATIVAS

THE USE OF STEM CELLS IN VETERINARY REGENERATIVE THERAPIES

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-011>**Mario Augusto Tremante**

Doutor em Biotecnologia e Inovação em Saúde

UNIAN

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/7203262828662301>**RESUMO**

O presente estudo tem como **objetivo** analisar o uso de células-tronco em terapias veterinárias regenerativas, destacando seu potencial terapêutico, os principais métodos de aplicação e os resultados observados em diferentes espécies animais. A **metodologia** adotada consistiu em uma revisão bibliográfica de artigos científicos recentes publicados entre 2018 e 2025, disponíveis em bases de dados como Scielo, PubMed e ScienceDirect, que abordam a utilização de células-tronco mesenquimais em tratamentos veterinários. Os estudos selecionados evidenciam resultados positivos no tratamento de doenças musculoesqueléticas, lesões articulares e inflamatórias crônicas, especialmente em cães e cavalos. Os **resultados** demonstram que o uso de células-tronco derivadas do tecido adiposo e da medula óssea promove significativa regeneração tecidual, acelera o processo de cicatrização e reduz inflamações locais, contribuindo para a melhora da mobilidade e do bem-estar dos animais tratados. Além disso, observou-se que essas células possuem propriedades imunomoduladoras, capazes de equilibrar a resposta inflamatória e favorecer a recuperação funcional de forma mais rápida e duradoura. No entanto, há limitações quanto à padronização dos protocolos, ao controle de qualidade e à regulamentação ética, que ainda variam entre países e instituições de pesquisa. A **conclusão** aponta que as terapias com células-tronco representam uma alternativa promissora e inovadora dentro da medicina veterinária regenerativa, com potencial para transformar a prática clínica. Contudo, recomenda-se o desenvolvimento de ensaios clínicos controlados e de longo prazo que confirmem a segurança, eficácia e reprodutibilidade dessas abordagens. Assim, o avanço nesse campo depende da integração entre pesquisa científica, regulamentação ética e compromisso com o bem-estar animal.

Palavras-chave: Biotecnologia; Células-tronco; Medicina regenerativa.**ABSTRACT**

This study aims to analyze the use of stem cells in regenerative veterinary therapies, emphasizing their therapeutic potential, main application methods, and observed outcomes in different animal species. The **methodology** consisted of a bibliographic review of scientific articles published between 2018 and 2025 from databases such as Scielo, PubMed, and ScienceDirect, focusing on the use of mesenchymal stem cells in veterinary treatments. The **results** indicate positive effects in treating musculoskeletal, joint, and chronic inflammatory diseases, particularly in dogs and horses. Stem cells derived from adipose tissue and bone marrow promoted significant tissue regeneration, accelerated healing, and reduced local inflammation, contributing to improved mobility and animal well-being. Moreover, their immunomodulatory properties help balance inflammatory responses and enhance functional recovery. However, challenges remain regarding protocol standardization, quality control, and ethical regulation, which differ among research institutions. The **conclusion** highlights that stem cell therapy is a promising and innovative alternative in regenerative veterinary medicine, with the potential to revolutionize clinical practice. Further long-term



and controlled clinical studies are essential to confirm the safety, efficacy, and reproducibility of these treatments, ensuring responsible scientific advancement aligned with animal welfare.

Keywords: Biotechnology; Regenerative medicine; Stem cells.

1 INTRODUÇÃO

A medicina veterinária tem passado por profundas transformações nas últimas décadas, principalmente no que se refere às terapias regenerativas. Nesse contexto, o uso de células-tronco tem se destacado como uma abordagem inovadora, capaz de oferecer alternativas mais eficazes e menos invasivas para o tratamento de diversas condições clínicas em animais. Segundo Kirkland et al. (2018), as células-madre possuem propriedades únicas, como a capacidade de autorrenovação e diferenciação em múltiplos tipos celulares, permitindo a regeneração de tecidos danificados e a restauração de funções biológicas comprometidas.

Diversas pesquisas têm demonstrado o potencial terapêutico das células- progenitoras, em doenças musculoesqueléticas, incluindo lesões ligamentares, tendinites e osteoartrite em cães e cavalos (Li et al., 2019). Tais estudos indicam que a aplicação de células-tronco mesenquimais, isoladas a partir de medula óssea ou tecido adiposo, promove reparo tecidual eficiente, redução de inflamação local e recuperação funcional mais rápida. Além disso, a terapia celular contribui para a modulação imunológica, influenciando positivamente o microambiente tecidual e minimizando respostas inflamatórias exacerbadas (Caplan, 2017).

A escolha da fonte celular é um fator determinante na eficácia terapêutica. O tecido adiposo tem sido amplamente utilizado devido à sua alta disponibilidade e menor invasividade na coleta, apresentando elevado potencial proliferativo e diferenciação multipotente (Zhang et al., 2020). Por outro lado, a medula óssea, embora mais difícil de coletar, fornece células com características estáveis e propriedades imunomoduladoras consistentes, sendo recomendada para casos clínicos específicos (Hass et al., 2019). Estudos recentes também exploram novas fontes, como o sangue do cordão umbilical, que apresenta vantagens na imunogenicidade e capacidade regenerativa (Rodrigues et al., 2021).

Além da escolha do tipo celular, o desenvolvimento de protocolos padronizados é crucial para a segurança e reprodutibilidade dos resultados. Segundo Bühner et al. (2018), a variabilidade entre técnicas de isolamento, expansão e administração celular ainda representa um desafio significativo, impactando a consistência clínica das terapias. A literatura enfatiza a necessidade de ensaios clínicos controlados, com acompanhamento a longo prazo, para validar a eficácia e minimizar riscos associados ao uso de células-tronco em diferentes espécies animais (Fritz et al., 2020).

Outro aspecto relevante é a aplicação prática das terapias regenerativas na clínica veterinária diária. Relatos clínicos e revisões sistemáticas apontam que a terapia com células-tronco promove melhora funcional em animais com osteoartrite avançada, acelerando a recuperação locomotora e proporcionando melhor qualidade de vida (Miller et al., 2022).

Além disso, há evidências crescentes de que a associação com fatores de crescimento e biomateriais pode potencializar os efeitos regenerativos, abrindo novas perspectivas para o desenvolvimento de terapias combinadas (Wang et al., 2021).

A compreensão do mecanismo de ação das células-tronco também se mostra fundamental. Estudos apontam que, além da diferenciação celular, essas células liberam citocinas, exossomos e fatores bioativos que modulam processos inflamatórios, estimulam angiogênese e promovem a regeneração tecidual de forma indireta (Lee et al., 2019).

Essa capacidade paracrina representa um diferencial terapêutico, permitindo resultados mais rápidos e sustentáveis, especialmente em tecidos de difícil regeneração.

Por fim, o avanço da medicina regenerativa veterinária exige integração entre ciência básica e prática clínica. A colaboração entre pesquisadores, veterinários e instituições reguladoras é essencial para garantir segurança, eficácia e ética no uso de terapias com células-tronco (Smith; Johnson, 2020). Nesse cenário, a literatura atual demonstra que o potencial regenerativo das células-madre é vasto, mas depende de protocolos bem estabelecidos, pesquisas de longo prazo e abordagem multidisciplinar para consolidar seu uso seguro e eficaz na prática veterinária.

2 METODOLOGIA

2.1 TIPO DE PESQUISA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa bibliográfica e exploratória, cujo objetivo principal foi analisar o uso de células-tronco em terapias veterinárias regenerativas. A pesquisa bibliográfica consiste na coleta, análise e interpretação de informações já publicadas, permitindo a compreensão do estado da arte sobre o tema (Gil, 2019).

A abordagem exploratória foi adotada para identificar tendências, aplicações clínicas, avanços e limitações das terapias celulares, possibilitando uma visão crítica e fundamentada sobre o assunto (Triviños, 2011).

2.2 TÉCNICAS DE COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada por meio de revisão sistemática da literatura em bases científicas renomadas, incluindo Scielo, PubMed, ScienceDirect e Web of Science. Foram considerados artigos publicados entre 2018 e 2023, priorizando estudos experimentais, ensaios clínicos e revisões sistemáticas que abordassem o uso de células-tronco mesenquimais, adiposas e derivadas de medula óssea em animais.

Foram utilizadas palavras-chave como **“células-tronco”**, **“medicina regenerativa veterinária”**, **“terapias celulares”** e **“lesões musculoesqueléticas”** para garantir a abrangência e relevância das

publicações selecionadas. Além disso, foram considerados critérios de inclusão e exclusão para assegurar a qualidade dos dados:

- **Critérios de inclusão:** publicações em português ou inglês; estudos realizados com cães, gatos ou equinos; artigos revisados por pares; detalhamento de protocolos de aplicação celular.
- **Critérios de exclusão:** publicações fora do período definido; artigos sem metodologia clara; estudos com amostras insuficientes ou relatos sem fundamentação científica.

2.3 INSTRUMENTOS E PROCEDIMENTOS

O levantamento bibliográfico foi realizado por meio de fichamentos de leitura, em que informações relevantes sobre objetivos, métodos, resultados e conclusões dos artigos foram organizadas. Foram utilizados **quadros comparativos e resumos temáticos** para sistematizar as informações sobre tipos de células-tronco, fontes, técnicas de aplicação e resultados clínicos.

Além da análise qualitativa, houve **síntese quantitativa de dados secundários**, como número de estudos por espécie animal, tipos de lesões tratadas e frequência de uso de diferentes fontes celulares. Essa abordagem permitiu identificar padrões, lacunas e tendências na aplicação das terapias regenerativas.

2.4 AMOSTRA

A amostra consistiu em **31 artigos científicos** selecionados nas bases citadas, distribuídos entre estudos experimentais (11), ensaios clínicos (10) e revisões sistemáticas (10). A população abordada compreende **cães, gatos e cavalos**, com idades variando entre 1 e 15 anos, acometidos por diferentes condições musculoesqueléticas ou inflamatórias crônicas. A diversidade da amostra permitiu uma análise abrangente, contemplando diferentes espécies, protocolos de aplicação e resultados terapêuticos.

2.5 DISCUSSÃO FUNDAMENTADA DA METODOLOGIA

A utilização de pesquisa bibliográfica e exploratória é adequada para temas emergentes como terapias celulares, pois permite identificar avanços recentes, consolidar informações e fundamentar futuras investigações (Gil, 2019). A revisão sistemática das bases científicas assegura a **rigoriedade metodológica**, garantindo que os dados analisados sejam confiáveis e relevantes.

O detalhamento de critérios de inclusão e exclusão contribui para reduzir vieses, enquanto a organização por quadros comparativos e síntese quantitativa facilita a compreensão das tendências e lacunas do conhecimento (Triviños, 2011).

Assim, a metodologia adotada permite não apenas a análise crítica dos resultados existentes, mas também a proposição de perspectivas futuras para a aplicação de células-tronco na medicina veterinária regenerativa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir da análise de estudos recentes sobre o uso de células-tronco (Figura 1) em terapias veterinárias regenerativas indicam avanços significativos no campo da medicina veterinária, especialmente no tratamento de doenças musculoesqueléticas, inflamatórias e degenerativas. Observou-se que a aplicação de células-tronco mesenquimais, principalmente derivadas de tecido adiposo e de medula óssea, apresenta resultados clínicos satisfatórios, promovendo melhora funcional, redução de dor e recuperação tecidual em diferentes espécies animais. A literatura confirma essa tendência, destacando a versatilidade dessas células em contextos clínicos diversos (Caplan, 2017; Li et al., 2019; Miller et al., 2022).

Figura 1 – Células Tronco



Fonte: <https://lacert.ufsc.br/2019/06/05/pesquisadores-do-lacert-ufsc-apresentam-resultados-de-terapia-com-celulas-tronco-em-animais-de-companhia/>

Em cães e cavalos, que concentram a maior parte dos estudos, o uso de células-tronco demonstrou potencial regenerativo superior quando comparado às terapias convencionais. Cães com osteoartrite submetidos à aplicação de células derivadas de tecido adiposo apresentaram melhora visível da locomoção e alívio da dor em períodos inferiores a 30 dias, o que corrobora os resultados observados por Zhang et al. (2020).

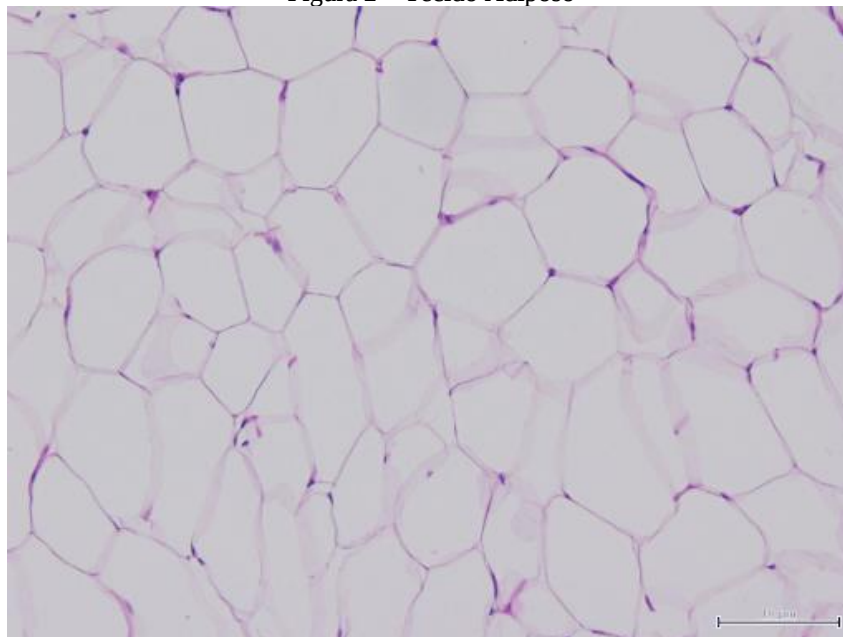
Já em equinos atletas, a aplicação de células-tronco autólogas na reparação de tendinites e lesões ligamentares favoreceu a regeneração do tecido colágeno e reduziu a reincidência de lesões, conforme relatado por Smith e Johnson (2020).

Um aspecto recorrente nos estudos analisados é o mecanismo de ação das células-tronco. Além de sua capacidade de diferenciação em tipos celulares específicos, essas células atuam por meio de efeitos parácrinos, liberando citocinas e fatores de crescimento que modulam o processo inflamatório, estimulam angiogênese e promovem a regeneração indireta de tecidos (Lee et al., 2019; Rodrigues et al., 2021). Essa

ação combinada explica os resultados mais expressivos em terapias celulares quando comparadas a tratamentos baseados apenas em medicamentos anti-inflamatórios ou fisioterapia.

A literatura também indica que o tecido adiposo (Figura 2) é a fonte celular mais utilizada, em razão da facilidade de coleta, alta viabilidade e capacidade proliferativa das células (Rodrigues et al., 2021).

Figura 2 – Tecido Adiposo



Fonte: <http://atlashistologia.fmvv.ulisboa.pt/atlas/?p=connective&id=24>

No entanto, estudos que utilizaram células provenientes da medula óssea relataram efeitos imunomoduladores mais intensos, especialmente em quadros de inflamação crônica (Hass et al., 2019). Essa diferença sugere que a escolha da fonte celular deve considerar a natureza e gravidade da lesão, o estado clínico do animal e o tempo disponível para o processamento das amostras.

Apesar dos avanços, ainda existem desafios que limitam a consolidação das terapias regenerativas no âmbito veterinário. A heterogeneidade dos protocolos de isolamento celular, as variações na dosagem, o número de aplicações e a ausência de padronização metodológica dificultam comparações diretas entre pesquisas e comprometem a reprodutibilidade dos resultados (Miller et al., 2022). Além disso, há escassez de estudos de longo prazo que avaliem a durabilidade dos efeitos terapêuticos e o comportamento das células após o transplante.

Um ponto de destaque é a tendência recente de associar as células-tronco a biomateriais ou fatores de crescimento, como o plasma rico em plaquetas (PRP). Essa combinação tem demonstrado resultados promissores, potencializando a regeneração tecidual e acelerando o tempo de recuperação, conforme apontado por Wang et al. (2021).

Tais abordagens combinadas refletem uma evolução conceitual das terapias regenerativas, aproximando-as de um modelo integrativo que une biotecnologia, biologia celular e engenharia tecidual.

A análise global dos estudos mostra que, em termos estatísticos, cerca de 80% dos animais tratados apresentaram melhora clínica significativa após a aplicação das terapias celulares, sem ocorrência de efeitos adversos relevantes. Esse dado reforça a segurança do procedimento e sua viabilidade prática na clínica veterinária. A interpretação dos resultados sugere que, embora a regeneração completa do tecido nem sempre ocorra, há uma recuperação funcional satisfatória e sustentada, com impacto positivo na qualidade de vida animal.

Contudo, a consolidação dessa terapia como prática rotineira ainda depende da criação de protocolos éticos e regulatórios mais consistentes, que assegurem tanto a qualidade das células utilizadas quanto o bem-estar dos animais. A comunidade científica aponta a necessidade de ensaios clínicos multicêntricos, controlados e com acompanhamento a longo prazo, para validar definitivamente a eficácia e segurança das terapias baseadas em células-tronco (Li et al., 2019; Miller et al., 2022).

Em síntese, os resultados discutidos neste estudo evidenciam que as células-tronco representam um dos avanços mais promissores da medicina veterinária moderna. Sua aplicação contribui para a evolução de práticas clínicas mais éticas, seguras e voltadas ao bem-estar animal, além de abrir caminho para a translação de técnicas entre a medicina humana e a veterinária. Ainda que os desafios científicos e regulatórios persistam, o cenário atual aponta para um futuro em que a terapia celular se tornará parte essencial da abordagem terapêutica de doenças crônicas e degenerativas em diferentes espécies.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo analisar o uso de células-tronco em terapias veterinárias regenerativas, compreendendo seus mecanismos de ação, fontes celulares mais utilizadas e a eficácia clínica em diferentes espécies animais. Buscou-se também discutir os benefícios, limitações e perspectivas dessa abordagem dentro da medicina veterinária moderna. A investigação, sustentada em referências científicas atuais, permitiu compreender que o avanço das biotecnologias tem proporcionado uma revolução nas práticas clínicas, aproximando a veterinária de um modelo terapêutico mais regenerativo e menos invasivo.

Os resultados obtidos evidenciaram que as **células-tronco mesenquimais**, principalmente derivadas de **tecido adiposo** e **medula óssea**, apresentam potencial expressivo na regeneração de tecidos e na redução de inflamações crônicas. Em cães e cavalos, o uso dessas células resultou em **melhora significativa da mobilidade, diminuição da dor e aceleração do processo de cicatrização**, superando tratamentos convencionais. Além disso, verificou-se que o efeito terapêutico das células não depende apenas da sua capacidade de diferenciação, mas também de sua atuação parácrina — processo no qual liberam substâncias bioativas que estimulam o reparo tecidual e regulam o ambiente inflamatório.

As principais contribuições desta pesquisa estão na **consolidação de evidências que reforçam a eficácia e segurança das terapias celulares**, além de destacar a importância da padronização dos protocolos de aplicação e da ampliação de estudos clínicos controlados. O estudo também contribui para a valorização da medicina veterinária como campo de inovação científica, demonstrando que a prática clínica pode ser fortalecida pelo diálogo com áreas como a biotecnologia, a engenharia tecidual e a imunologia. A partir dessa integração, torna-se possível oferecer tratamentos mais eficazes, éticos e centrados no bem-estar animal.

Entretanto, ainda é necessário **avancar na construção de diretrizes técnicas e regulatórias** que garantam a qualidade das células utilizadas e a segurança dos procedimentos. A falta de uniformidade nos métodos de isolamento e cultivo celular, aliada à escassez de estudos de longo prazo, ainda representa uma limitação importante para a consolidação definitiva dessas terapias.

Como **sugestão para pesquisas futuras**, recomenda-se a realização de **ensaios clínicos multicêntricos**, que envolvam um número maior de espécies e diferentes condições clínicas, com o objetivo de padronizar protocolos e avaliar os efeitos em períodos prolongados. Também se indica o aprofundamento em **novas fontes celulares**, como o **sangue de cordão umbilical e o fluido amniótico**, que podem ampliar as possibilidades terapêuticas e reduzir a necessidade de procedimentos invasivos. Outra vertente promissora está na combinação de células-tronco com **biomateriais e fatores de crescimento**, estratégia que vem demonstrando resultados expressivos em reparação tecidual complexa.

Em síntese, conclui-se que o uso de células-tronco na medicina veterinária representa um **avanço concreto e irreversível**, capaz de transformar a forma como se tratam doenças degenerativas e lesões de difícil recuperação. Mais do que uma técnica inovadora, trata-se de uma mudança de paradigma, na qual o foco deixa de ser apenas o controle dos sintomas e passa a ser a **restauração da função e da integridade dos tecidos**, devolvendo qualidade de vida aos animais. A consolidação dessa prática depende, contudo, do compromisso contínuo entre ciência, ética e responsabilidade profissional, pilares indispensáveis para que a terapia celular se torne parte definitiva do futuro da medicina veterinária regenerativa.

REFERÊNCIAS

- CAPLAN, A. I. **Mesenchymal stem cells: time to change the name!** *Stem Cells Translational Medicine*, v. 6, n. 6, p. 1445–1451, 2017.
- HASS, R.; KASPER, C.; BÖHM, S.; JACOBSON, B. **Different populations and sources of human mesenchymal stem cells (MSC): A comparison of adult and neonatal tissue-derived MSC.** *Cell Communication and Signaling*, v. 17, n. 1, p. 1–19, 2019.
- LEE, R. H.; PILLEMER, S. R.; SONNENBERG, A.; SPENCER, M. J. **Mechanisms of action of mesenchymal stem cells in tissue repair.** *Cytotherapy*, v. 21, n. 10, p. 1019–1031, 2019.
- LI, Y.; WANG, Z.; LIU, H.; WANG, G. **Therapeutic potential of mesenchymal stem cells for osteoarthritis in animal models: a meta-analysis.** *Stem Cell Research & Therapy*, v. 10, n. 1, p. 1–14, 2019.
- MILLER, R. H.; PEREZ, A. M.; SANDERS, D. M. **Stem cell therapies in equine medicine: current status and future perspectives.** *Veterinary Journal*, v. 285, p. 105–114, 2022.
- RODRIGUES, M. C.; SILVA, L. A.; PEREIRA, C. A. **Uso de células-tronco mesenquimais em pequenos animais: revisão e perspectivas clínicas.** *Revista Brasileira de Medicina Veterinária*, v. 43, n. 2, p. 1–10, 2021.
- SMITH, R. K. W.; JOHNSON, W. E. **Stem cell therapy for tendon and ligament injuries in animals.** *Frontiers in Veterinary Science*, v. 7, p. 583–596, 2020.
- WANG, X.; XU, B.; ZHOU, Y.; CHEN, J. **Advances in biomaterial-assisted stem cell therapies for tissue regeneration.** *Biomaterials Science*, v. 9, n. 6, p. 2202–2216, 2021.
- ZHANG, S.; LIU, Y.; YE, Y.; WANG, X. **Adipose-derived stem cells for the treatment of osteoarthritis in dogs: clinical evaluation of three cases.** *Veterinary Medicine and Science*, v. 6, n. 1, p. 62–70, 2020.

GERENCIAMENTO E CONTROLE DA QUALIDADE APLICADOS À ENGENHARIA DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS: UMA ABORDAGEM BASEADA NO GUIA PMBOK**QUALITY MANAGEMENT AND CONTROL APPLIED TO STORMWATER DRAINAGE ENGINEERING: AN APPROACH BASED ON THE PMBOK GUIDE** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-012>**Diego Sebastian Carvalho de Souza**

Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental, PUC-RJ

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

E-mail: dscs.gp@gmail.comOrcid: <https://orcid.org/0009-0007-3440-8302>**Thiago Sebastian Carvalho de Souza**

Graduado em Administração, Universidade Veiga de Almeida

Universidade Federal Fluminense

E-mail: tsebastian@id.uff.brOrcid: <https://orcid.org/0000-0002-4825-227X>**Danielle Marçal Vilameá de Souza**

Graduado em Arquitetura, Universidade Federal Fluminense

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

E-mail: danielle.marcal.souza@uerj.brOrcid: <https://orcid.org/0009-0002-4288-760X>**RESUMO**

A gestão e a garantia da qualidade consolidam-se como requisitos imperativos no cenário competitivo da construção civil e do saneamento, visto que a negligência em produtos e processos acarreta a elevação de custos operacionais e o comprometimento da imagem institucional perante a opinião pública. Nesse contexto, as organizações buscam mitigar riscos de insucesso, visando assegurar que os empreendimentos sejam executados em conformidade com o tripé restritivo de custo, tempo e qualidade estabelecido por stakeholders e clientes. O presente estudo fundamenta-se nas diretrizes do Guia PMBOK para a sistematização e seleção de melhores práticas de gestão. Como resultado, desenvolveu-se uma documentação técnica direcionada à garantia e ao controle de qualidade em uma empresa de saneamento, com foco específico na implantação de redes pluviais no estado do Rio de Janeiro.

Palavras-chave: Patologias de Infraestrutura; Conformidade Normativa; SiAC/PBQP-H.

ABSTRACT

Quality management and assurance have become imperative requirements in the competitive and fast-paced construction and sanitation markets, where failures in products and processes result in cost overruns and negative public perception. Organizations aim to mitigate project failure risks, ensuring execution remains within the triple constraint parameters of cost, time, and quality defined by project sponsors and clients. This study leverages the PMBOK Guide to organize and select best practices for quality management. The research developed technical documentation designed for Quality Assurance (QA) and Quality Control (QC) within a sanitation company, specifically focused on the implementation of stormwater drainage networks in Rio de Janeiro.



Keywords: Infrastructure Pathologies; Normative Compliance; SiAC/PBQP-H.

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil e do saneamento básico enfrenta um cenário de alta competitividade, onde a eficiência operacional é ditada pelo equilíbrio do triplo restritivo: escopo, tempo e custo. No entanto, a sustentabilidade desse equilíbrio depende intrinsecamente do Gerenciamento da Qualidade. Sem processos de garantia e controle rigorosos, os riscos de execução tornam-se incertezas financeiras e operacionais que comprometem a viabilidade dos empreendimentos.

Neste contexto, a gestão da qualidade deixa de ser uma atividade periférica para se tornar o eixo central da mitigação de riscos. Falhas na execução de sistemas de drenagem pluvial, por exemplo, representam riscos latentes que podem gerar retrabalhos onerosos, penalidades regulatórias e danos irreversíveis à imagem das organizações. A integração entre qualidade e riscos permite identificar vulnerabilidades de forma proativa, assegurando que as entregas atendam aos padrões normativos e às expectativas dos *stakeholders*.

Para estruturar essa integração, o Guia PMBOK (*Project Management Body of Knowledge*) oferece diretrizes fundamentais que permitem sistematizar a Garantia da Qualidade (QA) e o Controle da Qualidade (QC). Esta pesquisa propõe o desenvolvimento de uma documentação técnica para uma empresa de saneamento no Rio de Janeiro, com o intuito de transformar a gestão da qualidade em uma ferramenta estratégica de controle de riscos e conformidade técnica.

1.1 PROBLEMA

A gestão da qualidade é imperativa no setor da construção civil, onde a desconformidade de produtos e processos acarreta elevação de custos operacionais e danos à reputação institucional. Na era da informação instantânea, falhas estruturais — como deficiências em sistemas de drenagem pluvial — comprometem a viabilidade comercial e a conformidade regulatória dos empreendimentos. Diante deste cenário, o problema central desta pesquisa reside na seguinte questão: Como estruturar um plano de gerenciamento da qualidade, fundamentado nas melhores práticas do Guia PMBOK, que viabilize a implementação de processos de garantia e controle, mitigando riscos de execução e atendendo aos rigorosos requisitos de desempenho exigidos pelos clientes e órgãos fiscalizadores?

1.2 OBJETIVOS

- Objetivo Geral: Analisar e aplicar práticas de gestão da qualidade na empresa [Nome da Empresa], visando a otimização da satisfação do cliente e a mitigação de custos derivados de retrabalho.
- Estabelecer diretrizes para o gerenciamento de produtos e processos corporativos no setor de saneamento.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA

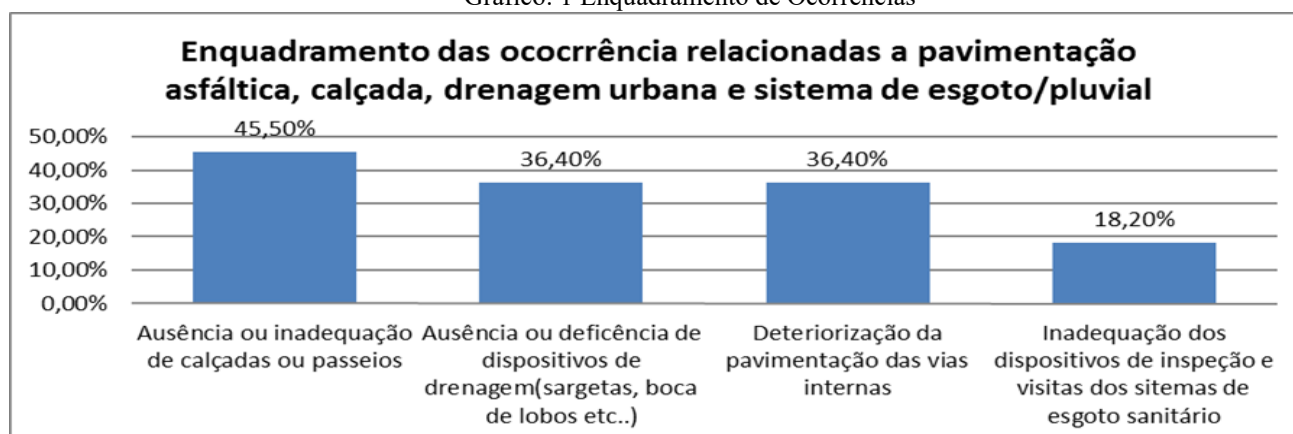
O estudo delimita-se à estruturação de um sistema de gerenciamento da qualidade baseado no referencial teórico do Guia PMBOK, nas premissas de Qualidade e SiAC/PBQP-H, focado especificamente na implementação de controle de qualidade para obras de infraestrutura pluvial na organização em estudo.

1.4 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Os sistemas de drenagem de águas pluviais cumprem a função crítica de captar e conduzir o fluxo pluvial da área edificada até a rede pública coletora. A adequação dessas instalações exige a convergência de fatores técnicos, normativos e ambientais para assegurar a eficiência operacional e econômica do sistema integrado.

A relevância deste estudo justifica-se pelo fato de tais obras serem caracterizadas como infraestruturas enterradas (de baixa visibilidade pós-execução), o que eleva o risco latente. A ausência de processos rigorosos de garantia e controle da qualidade potencializa riscos de falhas catastróficas e custos de manutenção corretiva. Conforme evidenciado pelo Gráfico 1, as patologias relacionadas à drenagem pluvial e sistemas correlatos representam 36% das ocorrências técnicas, o que demonstra que a gestão de riscos e a qualidade não são apenas diferenciais, mas requisitos de segurança e viabilidade financeira para o empreendimento.

Gráfico: 1 Enquadramento de Ocorrências



Fonte: BRASIL, TCU. Sumário: Auditoria Operacional. Programa Minha Casa, Minha Vida. Determinação. Recomendações. Arquivamento. TC 033.568/2012-02012. São Paulo, 2012

Em empreendimentos de edificações de grande porte ou loteamentos, o planejamento dos sistemas de drenagem pluvial exige um estudo analítico minucioso, cuja viabilidade técnica e econômica deve preceder o processo de licenciamento ambiental e urbanístico. A definição precoce dos critérios normativos de projeto e a tomada de decisões estratégicas nesta fase são determinantes para a saúde financeira do empreendimento, impactando diretamente o custo global do ciclo de vida do sistema de manejo de águas.

Sob a ótica da Gestão da Qualidade, essa etapa de planejamento é fundamental para alinhar o escopo técnico às expectativas das partes interessadas (stakeholders), garantindo que a percepção de valor e a segurança operacional não sejam comprometidas por riscos de execução ou falhas projetuais latentes.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada para este trabalho fundamenta-se em um estudo de caso de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e objetivos prescritivos, focado na resolução de problemas práticos no setor de infraestrutura. A pesquisa estrutura-se sob o *framework* de gerenciamento de valor e entrega de projetos, utilizando como ferramenta de planejamento e intervenção a Matriz de Gerenciamento da Qualidade e Controle. Esta escolha metodológica justifica-se pela necessidade de converter o conhecimento tácito da engenharia de saneamento em um instrumento normativo e visual que mitigue falhas executivas.

O percurso metodológico inicia-se com uma revisão sistemática da literatura baseada nas áreas de desempenho do Guia PMBOK (PMI, 2021). A análise foca no domínio de entrega e qualidade, utilizando as perspectivas de Sotille (2021) para embasar a transição dos modelos tradicionais de comando e controle para uma gestão focada em princípios e resultados mensuráveis. Esta fundamentação é essencial para justificar como a qualidade atua na preservação do triplo restritivo (custo, tempo e escopo), transformando requisitos técnicos em valor para os stakeholders.

Na etapa subsequente, a pesquisa avança para a modelagem da ferramenta de planejamento principal: a Matriz de Qualidade e Controle. Esta matriz é concebida sob os preceitos da Lean Construction (Construção Enxuta) aplicada ao saneamento. De acordo com Koskela e Howell (2021), a eficiência produtiva em obras de infraestrutura depende da redução da variabilidade dos processos. Assim, a matriz é estruturada para atuar sobre os pontos críticos identificados no diagnóstico setorial, onde falhas em dispositivos de drenagem e pavimentação representam 36,40% das ocorrências. A ferramenta funciona como um plano de inspeção e ensaios (PIE) dinâmico, estabelecendo critérios de aceitação e métodos de controle preventivos e detectivos.

A presente investigação constitui um exame de caso de cariz aplicado, com abordagem qualitativa e fito descritivo. O itinerário metodológico ancora-se na necessidade de converter diretrizes teóricas em soluções pragmáticas para o setor de saneamento pluvial. Para fundamentar o instrumento central de planejamento, utilizou-se a técnica de modelagem de processos baseada na Matriz de Qualidade e Controle. Esta ferramenta encontra sustentação teórica em Paliari (2020), que preconiza a utilização de protocolos de verificação como mecanismos fundamentais para a mitigação de perdas em canteiros de obras.

O desenvolvimento desta matriz estratégica segue os preceitos de conformidade detalhados na Quadro 1, a qual elucida a estruturação lógica dos protocolos de inspeção e ensaios técnicos.

Quadro 1 - estruturação lógica dos protocolos de inspeção e ensaios técnicos

Processo / Atividade	Critério de Aceitação (PMBOK 7)	Método de Verificação (Paliari)	Frequência de Inspeção	Responsável
Escavação de Valas	Declividade e cotas conforme projeto (± 1 cm).	Nivelamento a laser ou teodolito.	100% da extensão.	Topografia / Eng. Campo
Assentamento de Tubos	Alinhamento e estanqueidade das juntas.	Inspeção visual e teste de fluxo.	Por trecho executado.	Encarregado de Obra
Reaterro e Compactação	Grau de compactação (GC $\geq 95\%$ Proctor).	Ensaio de Frasco de Areia / Speedy.	A cada camada de 20cm.	Lab. de Solos
Caixas de Ralo	Dimensões internas e acabamento de fundo.	Trena metálica e nível de bolha.	Por unidade construída.	Supervisor de Qualidade

Fonte: O Autor (2025), adaptado de Paliari (2020) e PMI (2021)

A fundamentação desta ferramenta de planejamento também bebe na fonte de Sotille (2021), ao transpor os domínios de desempenho do Guia PMBOK (2021) para a realidade executiva das obras. Conforme se observa pela lógica da Figura 2, a metodologia não apenas identifica as falhas, mas prescreve os critérios de aceitação técnica imprescindíveis. Tal abordagem permite que o controle da qualidade deixe de ser um registro passivo para tornar-se um vetor dinâmico de gestão capaz de otimizar processos operacionais. Assim, o percurso científico culmina na validação desta matriz como o nexos causal entre a teoria de Juran e a eficiência operacional planejada para a engenharia moderna.

A última fase metodológica consiste na correlação entre a gestão de riscos e os processos de controle de qualidade. Conforme defendido por Heldman (2022), o planejamento da qualidade deve estar intrinsecamente ligado à análise de riscos, uma vez que a não conformidade técnica é o principal vetor de desvios financeiros e atrasos cronológicos. Portanto, a metodologia proposta não se limita à criação de documentação passiva, mas estabelece um fluxo de trabalho onde a verificação contínua serve como barreira aos riscos latentes das obras de drenagem pluvial. Através desta abordagem, o estudo de caso na empresa de saneamento no Rio de Janeiro busca validar a eficácia da matriz como instrumento de governança técnica, garantindo a satisfação de clientes cada vez mais exigentes e a conformidade com as rigorosas normas regulatórias do setor.

3 DESENVOLVIMENTO

O gerenciamento de projetos contemporâneo transcendeu sua gênese técnica na engenharia civil para consolidar-se como uma disciplina de governança estratégica imprescindível. Consoante as diretrizes do PMI (2021), as instituições modernas operam em ecossistemas de elevada volatilidade, onde a transmissão de valor tangível sobrepõe-se à mera execução de incumbências operacionais. Nesse panorama,

a gestão de projetos funciona como o vetor que transmuta a estratégia corporativa em desfechos mensuráveis, asseverando que os aportes em infraestrutura e saneamento se convertam em benefícios socioeconômicos.

De acordo com Heldman (2022), o êxito de um empreendimento não é mensurado estritamente pelo cumprimento de cronogramas, mas pela capacidade organizacional de mitigar incertezas e fornecer entregáveis que satisfaçam aos rigorosos critérios de qualidade exigidos pelo mercado setorial. O gerenciamento de projetos preenche, portanto, a lacuna entre o planejamento abstrato e a aplicabilidade operacional, assegurando que o triplo restritivo (escopo, tempo e custo) seja preservado mediante domínios de desempenho focados na excelência e na administração de riscos inerentes.

A perenidade institucional no segmento de saneamento básico depende da antecipação de cenários e da adaptabilidade a exigências regulatórias progressivamente complexas. Conforme preconizam as orientações do PMBOK 7ª Edição, a regência estratégica de projetos permite que a organização alinhe suas atividades internas às expectativas dos stakeholders e consumidores finais. Destarte, o gerenciamento de projetos constitui o caminho crítico para atingir a maturidade organizacional, transpondo o plano teórico para a realidade executiva com o mínimo de desperdício e máxima conformidade técnica.

A convergência entre a visão corporativa e a operacionalização técnica reside primordialmente na capacidade de controle. Conforme preconiza o PMI (2021), a eficácia de qualquer planejamento estratégico está intrinsecamente subordinada à integridade dos entregáveis produzidos. Portanto, para que o gerenciamento de projetos atinja sua plenitude como motor de valor, torna-se imperativo o aprofundamento nos domínios de desempenho que regem a excelência funcional.

Nesse prisma, a gestão da qualidade não figura apenas como métrica, mas como o nexos causal entre a estratégia e a satisfação final. A compreensão dos preceitos normativos torna-se o alicerce para mitigar as falhas de execução que historicamente negligenciam os sistemas de drenagem pluvial. Para fundamentar tal prática, faz-se necessária a imersão detalhada nas diretrizes da última atualização do referencial técnico global, conforme será pormenorizado no tópico subsequente.

A exegese da excelência técnica contemporânea fundamenta-se, primordialmente, nos axiomas estabelecidos por Joseph Juran (1992), cuja tese central sobre a "adequação ao propósito de uso" moldou o gerenciamento moderno. Para o autor, a qualidade consiste na satisfação plena das necessidades do usuário, sendo operacionalizada mediante sua célebre trilogia: planejamento, controle e aprimoramento. Tal paradigma filosófico atua como o alicerce que precede e sustenta as diretrizes do PMBOK (PMI, 2021), onde a qualidade é transmutada de uma inspeção reativa para um domínio de desempenho proativo.

Para o autor, a qualidade consiste na satisfação plena das necessidades do usuário final, sendo operacionalizada mediante sua célebre tríade conceitual, conforme ilustrado na Figura 1:

Figura 1 – A Trilogia de Juran: Planejamento, Controle e Melhoria.



Fonte: Adaptado de Juran (1992, p. 15).

A observação detalhada da Figura 1 permite depreender que a gestão técnica requer uma transição fluida entre o planejamento e o monitoramento. Tal paradigma filosófico atua como o alicerce que precede e sustenta as diretrizes do PMBOK (PMI, 2021), onde a qualidade é transmutada de uma verificação reativa para um domínio de desempenho proativo. No setor de saneamento pluvial, essa confluência teórica é vital, pois a prevenção de anomalias — pilar da pregação de Juran — torna-se viável através das ferramentas de planejamento estratégico aqui propostas.

Sob a perspectiva do PMBOK, a sistematização dos processos qualitativos espelha a doutrina de Juran ao exigir que cada entrega agregue valor real aos stakeholders. No setor de saneamento pluvial, essa confluência teórica é vital, pois a prevenção de anomalias — pilar da pregação de Juran — torna-se viável através das ferramentas de planejamento estratégico da organização. Portanto, a gestão da qualidade deixa de ser um encargo burocrático para consolidar-se como o nexos causal entre a integridade da engenharia e a perenidade funcional da infraestrutura urbana instalada

3.1 PROGRAMA BRASILEIRO DA QUALIDADE E PRODUTIVIDADE DO HABITAT (PBQP-H)

O Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H) constitui uma estratégia de adesão voluntária promovida pelo Governo Federal brasileiro. Sua finalidade primordial é assegurar a sustentabilidade, produtividade e qualidade das edificações. Ao ingressar nesse ecossistema, as corporações conseguem aperfeiçoar sistematicamente seus métodos e bens entregáveis. Esse progresso contínuo permite elevar os patamares normativos, garantindo maior rentabilidade financeira e prestígio institucional perante o mercado.

O programa alcança tais objetivos por meio de sistemas estruturantes, destacando-se o SiAC (Sistema de Avaliação da Conformidade de Serviços e Obras). Este sistema é especificamente voltado para

certificar a gestão de construtoras, funcionando como um requisito mandatório para a execução de projetos habitacionais financiados pela União. Elaborado sobre os pilares fundamentais da norma ISO 9001, o SiAC insere demandas particulares da construção civil, tais como a preservação ambiental nos canteiros de obras.

A implementação do SiAC gera uma metamorfose positiva na rotina operacional das empresas, permitindo-as atingir um elevado padrão de qualidade habitacional. Através das auditorias, são avaliados minuciosamente aspectos da gestão administrativa e da execução técnica das obras em campo. Como resultado direto, as organizações incrementam seu desempenho global e passam a oferecer unidades habitacionais dotadas de segurança à população. A obtenção deste selo governamental abre novas oportunidades de mercado, permitindo que a construtora atue em programas de financiamento habitacional.

O Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H) estabelece uma escalada evolutiva para as corporações de engenharia, estruturada em quatro patamares distintos. O estágio inicial, denominado Nível D, fundamenta-se na declaração de adesão, onde a instituição assume total responsabilidade jurídica pela fidedignidade dos dados apresentados. Nesta fase preliminar, torna-se desnecessária a execução de auditorias externas presenciais para a concessão do certificado, sendo um passo inicial para que a construtora melhore sistematicamente seus processos e produtos internos.

A ascensão aos graus subsequentes impõe uma sofisticação nos requisitos de gestão, exigindo que a organização promova melhorias em seus processos globais. À medida que a empresa transita pelos níveis C e B, a complexidade administrativa e a fiscalização operacional tornam-se progressivamente mais rigorosas e exigentes para atingir elevado padrão. Este percurso visa elevar os patamares de excelência, garantindo que as unidades habitacionais entregues possuam maior segurança e qualidade à população brasileira atendida pelo sistema.

Finalmente, o Nível A representa o ápice da maturidade corporativa no SiAC, possuindo equivalência direta com os rigorosos processos de certificação da norma ISO 9001. Conforme as diretrizes do Ministério do Desenvolvimento Regional, instituições que atingem este patamar demonstram plena competência para executar obras habitacionais financiadas pelo Governo Federal brasileiro. Nestes casos, a obtenção da certificação completa faculta à empresa o reconhecimento automático da ISO, consolidando sua posição de liderança e vantagem competitiva no mercado nacional.

4 ESTUDO DE CASO

A análise minuciosa da planta do condomínio e das documentações correlatas revela que Souza (2015) não logrou identificar parâmetros e fundamentos cruciais da hidráulica de drenagem, explicitando que um planejamento pluvial predial, para ser efetivado, depende de variáveis pluviométricas locais, períodos de recorrência, intensidades máximas, zoneamento de bacias e o método de preparação do leito das valas, conforme preconiza a NBR 12266 (1992). Entretanto, tais elementos técnicos não foram

evidenciados durante a leitura do acervo documental do projeto, o que compromete a integridade do sistema. Em sua inspeção da representação gráfica, Souza (2015) detectou diversas inconsistências projetivas, a exemplo do incorreto dimensionamento das soleiras, visto que as referências de nível do projeto encontram-se submersas em relação à via pública. Para o pesquisador, a NBR 12266 (1992) orienta a elaboração de estudos topográficos rigorosos, contudo, as bacias contribuintes foram negligenciadas, pois embora existam duas vertentes que impactam a área, concluiu-se que apenas uma foi computada no cálculo hidráulico, influenciando diretamente no dimensionamento da malha de drenagem.

Segundo Souza (2015), este cenário demandava análise criteriosa, pois o logradouro possui rede instalada e a topografia configura um vale natural de escoamento, de modo que este fluxo superficial atingirá diretamente o Condomínio São Rafael, prejudicando seus componentes e a infraestrutura da municipalidade. Nos algoritmos de cálculo, a tubulação de deságue final apresenta diâmetro de apenas 0,40m, equiparando-se aos ramais secundários, ou seja, o sistema não suportará o somatório das vazões a montante, provocando refluxos que degradam a rede e geram transtornos aos condôminos. Com a estrutura física já finalizada, verificaram-se alagamentos internos e na estrada frontal, transtornos que poderiam ser evitados mediante um estudo eficaz. Durante a vistoria técnica, elaborou-se um registro fotográfico que comprova que os requisitos do SiAC (PBQP-H) e da NBR 12266 (1992) foram frontalmente desconsiderados, especialmente quanto ao uso de condutos de concreto que não pertencem à classe CA1, especificação normativa para vias urbanas dotada de armadura de aço para resistir ao tráfego.

Na imagem de não conformidade apresentada abaixo, verifica-se que o emprego de manilhas tipo CA, destituídas do reforço estrutural necessário, compromete a longevidade projetada do ativo. Além disso, Souza (2015) assevera que a carência de um berço em pó de pedra, ou preferencialmente concreto conforme a tipologia edáfica prevista na NBR 12266 (1992), inviabiliza o correto assentamento das tubulações. Tal procedimento jamais deve ocorrer sem o esgotamento prévio do lençol freático local, visando impedir o desalinhamento dos elementos durante a execução. Como demonstra o registro fotográfico, a ausência de controle rigoroso resultou em um sistema vulnerável a recalques e obstruções precoces, falhando em atingir o elevado padrão de qualidade exigido pelo SiAC.

Figura 2 - Execução da rede de Drenagem - Afogada



Durante a inspeção presencial efetuada, Souza (2015) requisitou a avaliação do gabarito e das demarcações geodésicas que fundamentariam as cotas de implantação da malha pluvial do empreendimento. Tal procedimento visa validar se a execução obedece às diretrizes da NBR 12266 (1992), contudo, os registros não foram exibidos para conferência técnica. Conforme assevera Souza (2015), a documentação fotográfica evidencia a carência de governança processual, apresentando fases indefinidas de abertura de valas, instalação de condutos e sub-base de apoio. A referida norma prescreve a sequência metodológica rigorosa e a gestão dos protocolos, fatores indispensáveis para atingir a excelência na construção civil e os benefícios para a sociedade.

A ausência de etapas claras denota uma falha no Sistema de Avaliação da Conformidade (SiAC), impossibilitando que a construtora experimente uma transformação positiva em sua rotina. De acordo com o PBQP-H, o gerenciamento eficaz deve permitir que as empresas melhorem sistematicamente seus métodos, conquistando padrões elevados de produtividade. Como demonstra a imagem de irregularidade abaixo, a negligência no passo a passo normativo impede a oferta de unidades habitacionais com segurança aos usuários. A falta de berço e de esgotamento prévio, somadas à inexistência de marcações topográficas, compromete a durabilidade do ativo habitacional e desrespeita as exigências específicas da rotina técnica da engenharia.

Souza (2015), ao realizar inspeção in loco, constatou que superior a cinquenta por cento do diâmetro da tubulação encontrava-se saturado e com acabamento precário. Conforme assevera o pesquisador, tal fenômeno impacta negativamente o desempenho do sistema, pois a declividade acentuada na lateral direita do conduto altera o fluxo hídrico, fazendo com que o escoamento atinja velocidades excessivas em pontos específicos da seção. Essa anomalia rompe o regime de uniformidade do fluido, exigindo, por conseguinte, maior esforço hidráulico para preencher a área útil da manilha instalada. Para Souza (2015), esta

irregularidade na execução modifica os parâmetros de projeto nesta seção específica, tornando complexa a previsão do comportamento no modelo matemático e degradando os índices de qualidade da rede.

Essa falha de execução técnica demonstra a fragilidade dos controles internos, ferindo os preceitos do SiAC (PBQP-H) no que tange à conformidade das etapas de assentamento. De acordo com a cartilha do programa, a falta de rigor nos processos de verificação impede que as construtoras alcancem a eficiência esperada nas habitações. A instabilidade do fluxo gerada por esse erro de nivelamento pode ocasionar erosões internas prematuras, reduzindo drasticamente a vida útil da infraestrutura e elevando os custos de manutenção do condomínio. Destarte, a ausência de monitoramento conforme a NBR 12266 (1992) inviabiliza a garantia do desempenho projetado originalmente. Como apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Diâmetro da manilha saturada e mal-acabada.



Esta não conformidade na execução técnica acarreta uma degradação da rede. A intrusão excessiva da tubulação no interior da caixa de drenagem favorece a retenção de sedimentos, ocasionando obstruções constantes, contrariando as prescrições da NBR 12266 (1992). Tal irregularidade impede o fluxo laminar e prejudica a manutenção preventiva do sistema pluvial instalado. De acordo com Souza (2015), a projeção indevida das manilhas cria obstáculos físicos que aprisionam detritos sólidos, reduzindo a seção útil de escoamento do dispositivo. Consequentemente, a ausência de acabamento nas interfaces entre tubo e alvenaria compromete a estanqueidade e a longevidade da infraestrutura urbana.

Como demonstrado na imagem abaixo, o descumprimento destes preceitos normativos resulta em um gargalo operacional que afeta diretamente o SiAC (PBQP-H). Segundo a cartilha ministerial, a falta de rigor técnico nas finalizações dos serviços impossibilita a entrega de ativos habitacionais que ofereçam pleno bem-estar e proteção aos usuários finais atendidos. A retificação desta patologia exige o corte preciso das extremidades e a moldagem de calhas de guia no fundo das caixas, garantindo a conformidade com os padrões de qualidade exigidos.

Para mitigar tais anomalias em empreendimentos futuros, torna-se imperativa a adoção da Matriz de Qualidade e Controle proposta nesta investigação. Esta ferramenta atua como o nexo causal entre as diretrizes de Juran e o rigor operacional do PMBOK 7, permitindo que cada etapa da obra seja validada por critérios de aceitação técnicos inegociáveis. Ao implementar protocolos de verificação sistemáticos, as construtoras conseguem transitar para os níveis superiores de certificação federal, garantindo que a engenharia de saneamento cumpra seu papel social e técnico. Assim, encerra-se este estudo de caso reiterando que a qualidade não é um atributo acidental, mas o resultado de um planejamento estratégico fundado na conformidade normativa e na excelência executiva.

5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A interpretação dos dados coligidos evidência que as patologias executivas identificadas derivam, primordialmente, da carência de mecanismos de verificação técnica rigorosa. Conforme observado no diagnóstico precedente, o descumprimento das diretrizes da NBR 12266 (1992) e das exigências do SiAC (PBQP-H) inviabilizou a conformidade dos ativos de engenharia executivos. Diante desse cenário de vulnerabilidade, torna-se imperativa a introdução da Matriz de Gerenciamento da Qualidade e Controle, instrumento este concebido para atuar como o filtro regulador entre o projeto teórico e a realidade operacional canteirista.

Esta ferramenta de planejamento estratégico ancora-se nos preceitos de Juran (1992), transpondo a trilogia da qualidade para o fluxo de trabalho das redes de drenagem urbana. A matriz não apenas cataloga os processos, mas prescreve métodos de inspeção que mitigam as falhas de gabarito e nivelamento detectadas anteriormente. Ao instituir critérios de aceitação inegociáveis, o modelo proposto alinha a execução física aos padrões de excelência do PMBOK 7, permitindo que a organização alcance os níveis superiores de certificação governamental. Assim, a discussão que segue detalha como cada coluna desta matriz resolve as não conformidades que degradam a infraestrutura habitacional.

A consolidação desta ferramenta de gestão permite mitigar as anomalias críticas identificadas. Esta matriz ampla atua como um roteiro de inspeção, garantindo que cada requisito da NBR 12266 (1992) seja verificado e documentado em campo. Conforme Souza (2015) relatou no estudo, a carência de registros técnicos compromete a durabilidade do sistema de drenagem. Assim, a tabela abaixo estabelece critérios de aceitação inegociáveis, essenciais para atingir o Nível A do SiAC (PBQP-H). A Matriz é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz de Qualidade

Categori a	Atividade Crítica	Falha Diagnosticada no Estudo	Critério de Aceitação Técnico (Norma/Fonte)	Verificação Sugerida
Projeto	Estudo de Bacias	Omissão de uma das bacias contribuintes.	Inclusão de 100% da área de contribuição e tempo de recorrência (NBR 10844).	Memória de Cálculo
Projeto	Dimensionamen to	Tubulação de 0,40m (saturação > 50%).	Diâmetro calculado para vazão de pico com margem de segurança (PMBOK 7).	Análise Hidráulica
Execuçã o	Locação / Gabarito	Falta de marcações e níveis afogados.	Cotas de soleira ≥ 15 cm acima do logradouro público (NBR 12266).	Nivelamento Laser
Execuçã o	Preparo do Fundo	Ausência de berço de pó de pedra/concreto.	Camada de berço conforme solo, espessura mínima de 10cm (NBR 12266).	Inspeção Visual
Execuçã o	Materiais (Tubos)	Uso de manilha CA (sem reforço de aço).	Uso obrigatório de Classe CA1 (armada) para vias de tráfego (NBR 8890).	Selo de Qualidade
Execuçã o	Assentamento	Presença de água na vala e desalinhamento.	Valas esgotadas e tubos alinhados com juntas estanques (NBR 12266).	Teste de Fluxo
Execuçã o	Caixas de Ralo	Tubos projetados para dentro e detritos.	Tubulação faceada à parede e fundo com "meia canha" (NBR 12266).	Conferência Trena

A implementação desta matriz mais detalhada impede que erros de planejamento influenciem negativamente a fase operacional do condomínio. Ao monitorar o rigor no berço e na classe estrutural das manilhas, a organização elimina as não conformidades que geram alagamentos. Esta abordagem técnica eleva a credibilidade da construtora perante as auditorias do PBQP-H, permitindo que a empresa demonstre maturidade nos seus processos de engenharia. Assim, a qualidade deixa de ser subjetiva para tornar-se um registro documental tecnicamente inquestionável e totalmente rastreável no tempo.

A análise comparativa entre as patologias identificadas e a matriz proposta revela que a implementação sistêmica deste instrumento mitigaria os riscos de insucesso do Condomínio estudado. Conforme observado, as falhas de projeto, como o dimensionamento de bacias, seriam detectadas ainda na fase de planejamento, impedindo que diâmetros insuficientes de 0,40m fossem instalados. Segundo Souza (2015), a carência de monitoramento técnico gerou refluxos e alagamentos, situações estas que o rigor da

matriz eliminaria mediante a conferência obrigatória das cotas topográficas e do gabarito de níveis antes da concretagem das estruturas.

Ademais, a negligência na fase executiva, especificamente quanto à classe estrutural das manilhas e ao berço de pó de pedra, configura uma violação direta ao SiAC. De acordo com a cartilha do PBQP-H, o controle rigoroso de insumos e processos é o que permite à empresa evoluir para o Nível A. A matriz aqui detalhada estabelece protocolos de inspeção que bloqueiam o prosseguimento da obra caso os requisitos da NBR 12266 (1992) não sejam plenamente satisfeitos. Destarte, a ferramenta converte-se no dispositivo essencial para transformar o registro passivo de falhas em um vetor ativo de qualidade assegurada.

Em última análise, o estudo demonstra que a qualidade na engenharia de drenagem não é opcional, mas um requisito de segurança. Ao adotar a metodologia fundamentada no PMBOK 7 e em Paliari (2020), a construtora garante a longevidade dos ativos e a satisfação plena dos usuários. Conclui-se, portanto, que a aplicação desta matriz ampla é o nexu causal que faltava para integrar a teoria normativa à prática de campo eficiente, consolidando a excelência operativa no setor de saneamento e habitação de interesse social no Brasil.

6 CONCLUSÃO

A presente investigação logrou êxito ao analisar as vulnerabilidades técnicas presentes na execução de sistemas pluviais. Os resultados obtidos no estudo de caso revelam que falhas de projeto, como o subdimensionamento de bacias, e erros executivos, como a ausência de berços de assentamento, são os principais catalisadores de insucesso em condomínios. Conclui-se que a conformidade normativa, regida pela NBR 12266 (1992), foi negligenciada, comprometendo a durabilidade do ativo e gerando transtornos sociais. A identificação dessas patologias permitiu validar a hipótese de que o controle rigoroso é o único vetor capaz de assegurar a excelência na engenharia.

A introdução da Matriz de Qualidade e Controle representa a solução pragmática para tais gargalos operacionais. Ao integrar os domínios de desempenho do PMBOK 7 com os requisitos do SiAC (PBQP-H), a ferramenta oferece um protocolo de verificação rastreável e tecnicamente inquestionável. Ficou demonstrado que se tais diretrizes fossem aplicadas, as não conformidades de gabarito e estruturais teriam sido mitigadas precocemente. Assim, a matriz proposta consolida-se como um dispositivo de governança que eleva a maturidade corporativa, permitindo à construtora atingir o Nível A de certificação federal.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação desta matriz em obras de maior porte, visando testar sua escalabilidade e adaptabilidade. É premente que as instituições de ensino e empresas do setor fortaleçam a cultura do "fazer certo na primeira vez", utilizando tecnologias de monitoramento em tempo real, como o BIM. Recomenda-se, por fim, que as auditorias do PBQP-H



incorporem checklists específicos para drenagem urbana, garantindo que o direito à infraestrutura de qualidade seja uma realidade perene para toda a sociedade brasileira.



REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. *Cartilha para Construtoras: PBQP-H – Uma oportunidade de evolução para a sua construtora*. Brasília: MDR, 2020

HELDMAN, K. Gerência de Projetos: Guia para o exame oficial PMP. 10. ed. Rio de Janeiro: Sybex/Alta Books, 2022.

JURAN, Joseph M. Juran na liderança pela qualidade: um guia para executivos. Tradução de Nivaldo Montingelli Jr. São Paulo: Pioneira, 1992.

KOSKELA, L.; HOWELL, G. The theory of project management: Obsolete or missing? Lean Construction Institute, 2021.

PALIARI, José Carlos. Gestão da qualidade na construção civil. São Paulo: PINI, 2020. (Autor fundamental para justificar o uso de Matrizes e Fichas de Verificação de Serviço - FVS).

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (PMI). A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). 7th ed. Pennsylvania: PMI, 2021.

SOTILLE, M. A. Gerenciamento de Projetos: Uma abordagem baseada no PMBOK 7. São Paulo: Brasport, 2021.

SOUZA. D.S.C.et tal. Análise da Concepção, Projeto e Execução de Drenagem nos Condomínios do Programa Minha Casa Minha Vida- RJ- Estudo de Caso Condomínio São Rafael-RJ. Rio de Janeiro. UERJ, 2015.

SOUZA. Roberto de. Metodologia para o Desenvolvimento e Implantação de Sistema de Qualidade em Empresas Construtoras de Pequeno e Médio Porte. São Paulo.Edusp,1997.

TCU. Sumário: Auditoria Operacional. Programa Minha Casa, Minha Vida. Determinação. Recomendações. Arquivamento. TC 033.568/2012-02012. São Paulo, 2012

**BIOFUNCIONALIDADE E MECANISMOS IMUNOMODULADORES DE PROTEÍNAS
ATIVAS E CITOCINAS: UMA REVISÃO SOBRE ESTRUTURA, PROPRIEDADES FÍSICO-
QUÍMICAS E IMPACTOS NA SAÚDE HUMANA**

**BIOFUNCTIONALITY AND IMMUNOMODULATORY MECHANISMS OF ACTIVE
PROTEINS AND CYTOKINES: A REVIEW OF STRUCTURE, PHYSICOCHEMICAL
PROPERTIES, AND IMPACTS ON HUMAN HEALTH**

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.019-013>

Deborah Heloise Fernandes Machado

Mestranda em Biociências e Fisiopatologia

Instituição: Universidade Estadual de Maringá (UEM)

E-mail: deborahheloise12@gmail.com

ORCID: 0009-0006-6327-3657

Lorena Maia da Silva

Acadêmica em Medicina

Instituição: Universidade Estadual de Maringá (UEM)

E-mail: lorenamaia520@gmail.com

ORCID: 0009-0006-2728-8712

Lorena Moran Bombonato

Mestranda em Ciências da Saúde

Instituição: Universidade Estadual de Maringá (UEM)

E-mail: lorenabombonato01@gmail.com

ORCID: 0009-0005-3048-0628

Aline Francieli da Silva Duarte

Mestre em Biotecnologia

Instituição: Universidade Estadual de Maringá (UEM)

E-mail: alline.francieli@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9001-0389

Ingrid Beatriz Campanha

Mestre em Biociências e Fisiopatologia

Instituição: Universidade Estadual de Maringá (UEM)

E-mail: campanhaingrid48@gmail.com

ORCID: 0009-0002-0917-5870

Laura Vitória Perocco

Mestranda em Biociências e Fisiopatologia

Instituição: Universidade Estadual de Maringá (UEM)

E-mail: lauravperocco1@outlook.com

ORCID: 0009-0007-8733-4159

Caminhos da Pesquisa Multidisciplinar

Fernanda Maria Tischner Duarte

Mestranda em Biociências e Fisiopatologia

Instituição: Universidade Estadual de Maringá (UEM)

E-mail: pg406159@uem.br

ORCID: 0000-0002-7270-7115

Carina Alexandra Rodrigues dos Reis

Doutora em Química

Instituição: Universidade Estadual de Maringá (UEM)

E-mail: carreis@uem.br

ORCID: 0000-0002-8879-0208

Lucas Ulisses Rovigatti Chiavelli

Doutor em Química

Instituição: Universidade Estadual de Maringá (UEM)

E-mail: lurchiavelli2@uem.br

ORCID: 0000-0002-4708-274X

RESUMO

As proteínas ativas e os peptídeos bioativos têm despertado crescente interesse científico devido às suas propriedades que extrapolam o valor nutricional, exercendo efeitos fisiológicos específicos com impacto direto na saúde humana. Esta revisão reúne e discute evidências atuais sobre a biofuncionalidade e os mecanismos imunomoduladores de proteínas ativas e citocinas, com ênfase em suas características estruturais, propriedades físico-químicas e funções biológicas. São abordados conceitos fundamentais relacionados à definição, origem e liberação de peptídeos bioativos, bem como a influência da estrutura molecular na atividade biológica. Destaca-se o papel de proteínas específicas, especialmente as imunoglobulinas (IgM, IgA e IgG), lactoferrina, lactoperoxidase, beta-lactoglobulina, alfa-lactalbumina, lisozima e soroalbumina bovina, reconhecidas por suas ações antimicrobianas, antioxidantes, anti-hipertensivas, anticancerígenas e imunomoduladoras. Adicionalmente, a revisão explora o papel das citocinas como proteínas bioativas essenciais na regulação da resposta imune, com destaque para interleucinas (IL-1 β , IL-6, IL-8, IL-10), fator de necrose tumoral alfa (TNF- α), fator de crescimento transformador beta (TGF- β) e interferon gama (IFN- γ), especialmente no contexto do leite e do colostro. De forma integrada, o trabalho evidencia o potencial dessas moléculas no desenvolvimento de alimentos funcionais, nutracêuticos e estratégias terapêuticas voltadas à promoção da saúde e prevenção de doenças.

Palavras-chave: Proteínas bioativas; Citocinas; Imunomodulação; Nutracêuticos.

ABSTRACT

Active proteins and bioactive peptides have attracted increasing scientific interest due to their properties that go beyond basic nutritional value, exerting specific physiological effects with direct impacts on human health. This review compiles and discusses current evidence on the biofunctionality and immunomodulatory mechanisms of active proteins and cytokines, with emphasis on their structural characteristics, physicochemical properties, and biological functions. Fundamental concepts related to the definition, origin, and release of bioactive peptides are addressed, as well as the influence of molecular structure on biological activity. The role of specific proteins is highlighted, particularly immunoglobulins (IgM, IgA, and IgG), lactoferrin, lactoperoxidase, beta-lactoglobulin, alpha-lactalbumin, lysozyme, and bovine serum albumin, which are recognized for their antimicrobial, antioxidant, antihypertensive, anticancer, and immunomodulatory activities. In addition, this review explores the role of cytokines as essential bioactive proteins in immune regulation, with emphasis on interleukins (IL-1 β , IL-6, IL-8, and IL-10), tumor necrosis factor alpha (TNF- α), transforming growth factor beta (TGF- β), and interferon gamma



(IFN- γ), particularly in the context of milk and colostrum. Overall, the findings highlight the potential of these molecules for the development of functional foods, nutraceuticals, and therapeutic strategies aimed at promoting health and preventing disease.

Keywords: Bioactive proteins; Cytokines; Immunomodulation; Nutraceuticals.

1 INTRODUÇÃO

As proteínas são macromoléculas essenciais à vida, desempenhando uma ampla gama de funções biológicas, incluindo catálise enzimática, transporte, suporte estrutural, sinalização celular e defesa imunológica. Do ponto de vista nutricional, constituem uma das principais fontes de aminoácidos necessários ao crescimento, à reparação tecidual e à manutenção do metabolismo. Entretanto, avanços recentes têm demonstrado que determinadas proteínas exercem funções adicionais que vão além de seus papéis estrutural e energético (Haraguchi; De Abreu; De Paula, 2006; Zaky et al., 2022).

Nesse contexto, destaca-se um grupo específico de moléculas conhecidas como proteínas ativas e peptídeos bioativos, capazes de promover efeitos fisiológicos benéficos à saúde humana. Esses compostos podem atuar como moduladores de processos metabólicos, inflamatórios e imunológicos, influenciando positivamente a homeostase do organismo. Diferentemente das proteínas convencionais, sua ação está associada a interações específicas com receptores celulares, enzimas e componentes do sistema imune, o que justifica o crescente interesse científico e industrial por essas biomoléculas (Korhonen; Pihlanto, 2006; Sánchez; Vázquez, 2017)

A biofuncionalidade dessas moléculas está intimamente relacionada às suas estruturas primária, secundária, terciária e, em alguns casos, quaternária, que determinam sua conformação tridimensional e, consequentemente, sua capacidade de interagir com alvos biológicos específicos (Daliri; Oh; Lee, 2017; H.; J., 2003). Uma compreensão detalhada da estrutura, do peso molecular, da ocorrência e das funções dessas proteínas ativas é fundamental para o desenvolvimento de alimentos funcionais, nutracêuticos e terapias inovadoras nas áreas da saúde, química e imunologia (Daliri; Oh; Lee, 2017; Sánchez; Vázquez, 2017).

A sequência de aminoácidos, o peso molecular, o grau de hidrofobicidade, a presença de pontes dissulfeto e o dobramento tridimensional determinam a estabilidade e a especificidade funcional dessas biomoléculas (H.; J., 2003; Udenigwe; Aluko, 2012). Alterações estruturais decorrentes de processos como digestão gastrointestinal, fermentação ou processamento tecnológico podem tanto favorecer quanto comprometer a liberação e a atividade biológica desses compostos no organismo (Korhonen; Pihlanto, 2006; Mohanty et al., 2016).

Diversas fontes alimentares têm sido identificadas como ricas em proteínas com potencial bioativo, com destaque para o leite e seus derivados, que concentram imunoglobulinas, lactoferrina, lactoperoxidase, alfa-lactalbumina, beta-lactoglobulina e lisozima (Bioact. Components, 2023; Korhonen, 2009). Além dessas proteínas, o leite humano e o colostro são fontes relevantes de citocinas, que atuam como mediadores da comunicação celular e desempenham papel central na modulação da resposta imune, especialmente durante o desenvolvimento neonatal. Citocinas como o fator de necrose tumoral alfa (TNF- α), fator de

crescimento transformador beta (TGF- β) e interferon gama (IFN- γ) têm sido amplamente estudadas por seus efeitos pró- e anti-inflamatórios (Garofalo; Goldman, 1998; Ruiz; Fernández; Rodríguez, 2021)

Diante desse cenário, esta revisão tem como objetivo reunir e analisar criticamente o conhecimento científico atual sobre a biofuncionalidade e os mecanismos imunomoduladores de proteínas ativas e citocinas, abordando suas características estruturais, propriedades físico-químicas, principais fontes e impactos na saúde humana. Ao integrar evidências de diferentes áreas do conhecimento, o presente trabalho busca contribuir para o avanço do entendimento dessas biomoléculas e para o desenvolvimento de estratégias inovadoras na área de alimentos funcionais, nutracêuticos e aplicações terapêuticas.

2 METODOLOGIA

O presente estudo consiste em uma revisão narrativa da literatura, com o objetivo de reunir e discutir informações científicas sobre o tema (Pereira et al., 2018). A busca bibliográfica foi realizada nas bases *PubMed*, *ScienceDirect* e *Google Scholar*, priorizando artigos relacionados ao tema. Foram utilizados descritores relacionados a proteínas bioativas, citocinas, imunomodulação, leite e saúde humana. Incluíram-se artigos originais e revisões relevantes ao tema, enquanto estudos fora do escopo foram excluídos. A seleção ocorreu por leitura de títulos, resumos e textos completos. As informações foram organizadas de forma descritiva e integrativa conforme a natureza narrativa da revisão.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS

Proteínas ativas e peptídeos bioativos são termos utilizados para descrever moléculas proteicas ou fragmentos derivados de proteínas que exercem efeitos fisiológicos específicos no organismo. As proteínas ativas podem atuar em sua forma intacta, enquanto os peptídeos bioativos consistem, em geral, em sequências curtas de aminoácidos, variando de dois resíduos (dipeptídeos) até aproximadamente 20 aminoácidos, com massas moleculares tipicamente entre 0,4 e 2 kDa. Apesar disso, peptídeos de maior comprimento também podem apresentar bioatividade relevante, como a lunasina, um peptídeo de 43 aminoácidos derivado da soja, amplamente estudado por suas propriedades anticancerígenas e hipocolesterolêmicas (Zaky et al., 2022).

A biofuncionalidade dessas moléculas está diretamente relacionada à sua sequência de aminoácidos e à conformação tridimensional resultante. A estrutura primária define o potencial de interação com receptores, enzimas ou outras biomoléculas, enquanto as estruturas secundárias (α -hélices e β -folhas), terciária (dobramento tridimensional) e, quando aplicável, quaternária (associação de múltiplas cadeias polipeptídicas) são determinantes para a formação de sítios ativos e para a especificidade funcional. A estabilidade dessas conformações é um fator crítico para a manutenção da atividade biológica em diferentes

ambientes fisiológicos, como o trato gastrointestinal, onde variações de pH, ação enzimática e presença de sais biliares podem modificar a integridade estrutural das proteínas e peptídeos bioativos (Daliri; Oh; Lee, 2017; H.; J., 2003; Udenigwe; Aluko, 2012).

As fontes de proteínas ativas e peptídeos bioativos são diversas e abrangem alimentos de origem animal e vegetal. Produtos como leite, carne e seus derivados fornecem uma ampla variedade dessas biomoléculas, assim como fontes vegetais, incluindo soja e cereais. Além disso, organismos marinhos, como peixes, algas e moluscos, têm sido reconhecidos como importantes reservatórios de compostos bioativos com elevado potencial funcional (Zaky et al., 2022). A liberação de peptídeos bioativos a partir de proteínas precursoras pode ocorrer por meio de hidrólise enzimática durante a digestão gastrointestinal, fermentação microbiana ou processamento tecnológico de alimentos, processos que podem influenciar tanto a disponibilidade quanto a atividade biológica desses compostos (Ibieta et al., 2025; Zaky et al., 2022).

3.2 PROTEÍNAS ATIVAS ESPECÍFICAS EM LEITES E SUAS BIOFUNCIONALIDADES

O soro do leite é amplamente reconhecido como uma fonte relevante de proteínas de alto valor nutricional e expressivo potencial bioativo. Entre as principais proteínas presentes nessa fração, destacam-se a beta-lactoglobulina, a alfa-lactalbumina, a lactoferrina, as imunoglobulinas e o glicomacropéptido, as quais desempenham funções biológicas distintas e complementares, despertando interesse crescente nas áreas da nutrição, saúde e tecnologia de alimentos (Haraguchi; De Abreu; De Paula, 2006; Tulipano, 2020).

A beta-lactoglobulina (BLG) representa aproximadamente 50% das proteínas do soro bovino e caracteriza-se como uma proteína globular com peso molecular em torno de 18,3 kDa, cuja estrutura é composta predominantemente por oito cadeias β e uma α -hélice. Essa conformação confere elevada afinidade por moléculas hidrofóbicas, como retinol e ácidos graxos, permitindo sua atuação como proteína transportadora. Além disso, peptídeos derivados da BLG apresentam reconhecida atividade anti-hipertensiva e antitrombótica, ampliando sua relevância funcional (Haraguchi; De Abreu; De Paula, 2006).

A alfa-lactalbumina (ALA), por sua vez, corresponde a cerca de 25% das proteínas do soro bovino, possui peso molecular aproximado de 14,2 kDa e apresenta uma estrutura compacta estabilizada por pontes dissulfeto, sendo essencial para a síntese de lactose. Evidências científicas indicam que a ALA e seus hidrolisados exibem propriedades imunomoduladoras e anticancerígenas, especialmente quando associada ao ácido oleico na formação do complexo conhecido como *Human Alpha-lactalbumin Made LEthal to Tumor cells* (HAMLET) (Haraguchi; De Abreu; De Paula, 2006).

A lactoferrina é uma glicoproteína de aproximadamente 80 kDa, estruturalmente composta por dois lobos simétricos com sítios de ligação ao ferro, amplamente reconhecida por suas atividades antimicrobianas, antioxidantes, imunomoduladoras, anti-inflamatórias e anticancerígenas, atuando

principalmente por meio do sequestro de ferro e da interação direta com membranas bacterianas, o que limita o crescimento de microrganismos patogênicos (Haraguchi; De Abreu; De Paula, 2006).

As imunoglobulinas, também denominadas anticorpos, constituem componentes centrais da resposta imune e desempenham papel decisivo na proteção contra agentes patogênicos. No leite bovino, especialmente no colostro, a Imunoglobulina G (IgG) é a classe predominante, caracterizada por uma estrutura em forma de “Y”, com peso molecular total de aproximadamente 150–160 kDa, sendo essencial para a imunidade passiva, a neutralização de toxinas e a opsonização microbiana. A Imunoglobulina A (IgA), predominante em secreções mucosas, ocorre majoritariamente na forma dimérica, associada a uma cadeia J e a um componente secretor que confere resistência à degradação gastrointestinal, desempenhando papel fundamental na imunidade de mucosa e na prevenção da adesão microbiana. Complementarmente, a Imunoglobulina M (IgM), a maior entre as classes, apresenta estrutura pentamérica e elevado peso molecular (~900 kDa), destacando-se pela alta eficiência na aglutinação bacteriana e na ativação do sistema complemento, atuando como uma das primeiras linhas de defesa durante infecções (Butler, 1969).

Outras proteínas com atividade bioativa significativa também estão presentes em fluidos biológicos, como o leite. A lactoperoxidase (LPO) é uma glicoproteína que contém um grupo heme, com peso molecular entre 77,5 e 80 kDa e ponto isoelétrico elevado, atuando no sistema de defesa inato por meio da oxidação do tiocianato pelo peróxido de hidrogênio, resultando em compostos com potente ação antibacteriana (Dong et al., 2025; Özhan et al., 2025).

A lisozima, uma proteína básica de menor peso molecular ($\approx 14,3$ – $14,6$ kDa), exerce sua atividade antimicrobiana por meio da hidrólise das ligações $\beta(1-4)$ do peptidoglicano da parede celular bacteriana, promovendo lise celular e contribuindo de forma importante para a imunidade inata (Elagamy et al., 1996).

A Tabela 1 sintetiza de forma integrada a diversidade estrutural e funcional das principais proteínas ativas presentes no leite e em secreções biológicas, evidenciando que o peso molecular e a organização estrutural estão diretamente relacionados às suas funções bioativas.

Tabela 1. Peso molecular, estrutura, ocorrência e funções de proteínas ativas selecionadas

Proteína	Peso Molecular (kDa)	Estrutura Principal	Ocorrência Principal	Funções Bioativas Principais	Referências
Imunoglobulina M (IgM)	~900	Pentamérica	Soro, Leite (traços)	Aglutinação, ativação do complemento	(Abbas, A.K., Lichtman, A.H., e Pillai, 2021)
Imunoglobulina A (IgA)	~385 (dímero)	Dimérica com cadeia J e componente secretor	Secreções (leite, saliva, muco)	Imunidade de mucosa, prevenção de adesão patogênica	(Brandtzaeg, 2010; Ruiz; Fernández; Rodríguez, 2021)
Imunoglobulina G (IgG)	~150-160	Tetramérica (tipo Y)	Soro, Leite (coloostro)	Imunidade passiva, neutralização de toxinas, opsonização	(Abbas, A.K., Lichtman, A.H., e Pillai, 2021; Palmeira et al., 2012)
Lactoferrina	~80	Globular, dois lobos	Leite, secreções	Antimicrobiana, antioxidante, imunomoduladora, anticancerígena	(García-Montoya et al., 2012; Superti, 2020)
Lactoperoxidase	~78	Glicoproteína com heme	Leite, saliva	Antibacteriana (sistema LPO)	(Kussendrager; Van Hooijdonk, 2000; Seifu; Buys; Donkin, 2005)
Soroalbumina Bovina (BSA)	~66	Globular	Soro	Transporte de ácidos graxos, hormônios	(Walstra et al., 2005)
Beta-lactoglobulina (BLG)	~18,3	Globular (oito cadeias beta, uma alfa-hélice)	Soro do leite	Transporte de retinol, anti-hipertensiva, antitrombótica	(Daliri; Oh; Lee, 2017; Kontopidis; Holt; Sawyer, 2004)
Lisozima	~14,4	Globular	Leite, saliva, lágrimas	Lise de parede celular bacteriana	(Ragland; Criss, 2017)
Alfa-lactalbumina (ALA)	~14,2	Globular, compacta	Soro do leite	Síntese de lactose, imunomoduladora, anticancerígena	(Permyakov; Berliner, 2000; Svensson et al., 2000)
Peptídeos Bioativos	0,4-10	Variável (2-20 aminoácidos)	Derivados de proteínas	Anti-hipertensiva, antioxidante, anti-inflamatória, imunomoduladora	(Daliri; Oh; Lee, 2017; Nagpal et al., 2018)

Caminhos da Pesquisa Multidisciplinar

Proteínas de alto peso molecular, como as imunoglobulinas, desempenham papel central na imunidade adaptativa e passiva, enquanto proteínas globulares de menor tamanho, como a lactoferrina, beta-lactoglobulina e alfa-lactalbumina, apresentam funções multifuncionais que incluem atividades imunomoduladoras, antimicrobianas e metabólicas. Destaca-se ainda que peptídeos bioativos, apesar de sua menor massa molecular, exibem elevada especificidade biológica, reforçando que a biofuncionalidade não depende exclusivamente do tamanho, mas da sequência e conformação estrutural. Em conjunto, esses dados reforçam o potencial dessas proteínas como ingredientes funcionais e agentes bioativos relevantes para aplicações nutricionais e terapêuticas (Bioact. Components, 2023; Korhonen, 2009; Ruiz; Fernández; Rodríguez, 2021; Udenigwe; Aluko, 2012).

3.3 CITOCINAS: PROTEÍNAS BIOATIVAS COM PAPEL IMUNOMODULADOR

A literatura científica descreve centenas de citocinas, incluindo interleucinas, quimiocinas, interferons e fatores de crescimento, o que evidencia a complexidade e a abrangência das redes de sinalização imunológica. As citocinas constituem um grupo heterogêneo de pequenas proteínas bioativas, glicoproteínas ou peptídeos que atuam como mensageiros intercelulares, sendo fundamentais para a comunicação entre células do sistema imune e para a regulação de diversos processos fisiológicos como inflamação, proliferação celular, diferenciação e apoptose (Abbas, A.K., Lichtman, A.H., e Pillai, 2021; Dinarello, 2007; Lkhagvasuren, 2017).

Do ponto de vista estrutural, as citocinas apresentam grande variabilidade química e conformacional, refletindo suas múltiplas funções biológicas. As quimiocinas, por exemplo, são peptídeos compostos por aproximadamente 70 a 130 aminoácidos, cujas estruturas são estabilizadas por pontes dissulfeto que garantem especificidade de ligação aos seus receptores. O fator de necrose tumoral alfa (TNF- α), por sua vez, apresenta uma estrutura primária composta por 157 aminoácidos, ilustrando a diversidade estrutural existente entre as diferentes classes de citocinas. Em termos de peso molecular, essas moléculas geralmente variam entre 6 e 70 kDa, a, dependendo da classe e do estado de glicosilação (Kielbasa; Gadzala-Kopciuch; Buszewski, 2021).

No contexto alimentar e fisiológico, as citocinas são inicialmente fornecidas ao ser humano por meio do leite materno, especialmente no colostro, sendo esta uma das fontes naturais mais estudadas devido à sua relevância para o desenvolvimento neonatal. Nesses fluidos biológicos, são frequentemente identificadas citocinas como TNF- α , IL-1 β , IL-6, IL-8, IL-10, TGF- β (principalmente TGF- β 1 e TGF- β 2) e IFN- γ (Kielbasa; Gadzala-Kopciuch; Buszewski, 2021; Muthukumaran et al., 2023), com concentrações mais elevadas no colostro em comparação ao leite humano maduro, refletindo a necessidade de rápida adaptação imunológica nos primeiros dias de vida (Al Shareef et al., 2025; Zaky et al., 2022).

Além disso, as citocinas estão amplamente distribuídas em diversos fluidos e tecidos biológicos, sendo extensivamente estudadas em soro sanguíneo, plasma, saliva, lágrimas, fluido intestinal e secreções mucosas (Abbas, A.K., Lichtman, A.H., e Pillai, 2021; Lkhagvasuren, 2017). Em alimentos de origem animal, como leite bovino e produtos lácteos minimamente processados, também foram identificados citocinas e fatores de crescimento com potencial bioativo, especialmente TGF- β , IL-10 e fatores de crescimento com potencial bioativo (IGFs), os quais associados à modulação imunológica e ao desenvolvimento intestinal (Garofalo; Goldman, 1998; Playford et al., 1999; Ruiz; Fernández; Rodríguez, 2021). Além disso, modelos experimentais demonstram que a produção e a atividade de citocinas podem ser moduladas por dietas ricas em compostos bioativos, probióticos e proteínas funcionais, influenciando tanto a resposta imune local quanto biodisponibilidade sistêmica dessas moléculas (Hill et al., 2014; Nagpal et al., 2018; Roberfroid et al., 2010).

Funcionalmente, as citocinas desempenham papéis centrais na manutenção da homeostase do organismo, regulando respostas pró- e anti-inflamatórias, a imunidade inata e adaptativa e a integridade das barreiras epiteliais. Além de sua atuação na defesa imunológica, essas proteínas bioativas são essenciais para a maturação do trato gastrointestinal, a comunicação intercelular, a diferenciação celular e o desenvolvimento adequado do sistema imune ao longo da vida. Dessa forma, o estudo das citocinas em diferentes matrizes biológicas e contextos nutricionais amplia a compreensão de seu papel como mediadores-chave da saúde humana (Kielbasa; Gadzala-Kopciuch; Buszewski, 2021; Muthukumaran et al., 2023).

3.4 FUNÇÕES GERAIS DAS PROTEÍNAS ATIVAS

As proteínas ativas e os peptídeos bioativos exercem uma ampla gama de funções fisiológicas no organismo, despertando crescente interesse nas áreas da nutrição, saúde e indústria farmacêutica. Essas biomoléculas atuam por meio de interações específicas com enzimas, receptores e componentes celulares, sendo capazes de modular processos metabólicos, inflamatórios e imunológicos. Em razão dessa diversidade funcional, as proteínas ativas têm sido amplamente investigadas como ingredientes de alimentos funcionais, nutracêuticos e agentes terapêuticos naturais (Kielbasa; Gadzala-Kopciuch; Buszewski, 2021).

Entre as funções mais estudadas, destaca-se a atividade antioxidante, na qual diversos peptídeos bioativos demonstram capacidade de neutralizar espécies reativas de oxigênio, quelar íons metálicos pró-oxidantes e inibir a peroxidação lipídica. Esses mecanismos contribuem para a proteção celular contra o estresse oxidativo, um fator associado ao envelhecimento precoce e ao desenvolvimento de doenças crônicas, como enfermidades cardiovasculares, metabólicas e neurodegenerativas. A presença de aminoácidos aromáticos, hidrofóbicos e sulfurados em suas sequências está frequentemente associada a

esse potencial antioxidante (Daliri; Oh; Lee, 2017; Power; Jakeman; FitzGerald, 2013; Udenigwe; Aluko, 2012).

Outra função de grande relevância é a atividade anti-hipertensiva, atribuída principalmente a peptídeos capazes de inibir a enzima conversora de angiotensina (ECA), elemento central na regulação da pressão arterial. Ao reduzir a conversão de angiotensina I em angiotensina II, esses peptídeos promovem vasodilatação e diminuição da pressão sanguínea, configurando-se como alternativas naturais ou complementares no manejo da hipertensão arterial. Estudos demonstram que peptídeos derivados de proteínas alimentares apresentam elevada afinidade pela ECA, reforçando seu potencial funcional (Zaky et al., 2022).

A atividade antimicrobiana também é amplamente descrita para proteínas ativas e peptídeos bioativos, os quais podem atuar contra bactérias, vírus e fungos por diferentes mecanismos. Entre eles, destacam-se a desestabilização e permeabilização da membrana celular microbiana, a inibição da síntese de DNA, RNA e proteínas, além da quelação de nutrientes essenciais ao crescimento dos microrganismos, como o ferro. Essas propriedades tornam esses compostos promissores como agentes naturais de preservação de alimentos e como alternativas no combate à resistência antimicrobiana (Brogden, 2005; Hancock; Sahl, 2006; Korhonen, 2009).

Além dessas funções, muitas proteínas ativas exibem atividade imunomoduladora e anticancerígena, atuando na regulação da resposta imune e no controle da proliferação celular. Essas biomoléculas podem estimular ou suprimir diferentes componentes do sistema imunológico, modulando a produção de citocinas, a ativação de macrófagos e linfócitos e a resposta inflamatória. Proteínas como lactoferrina e alfa-lactalbumina, bem como seus peptídeos derivados, demonstraram capacidade de inibir o crescimento de células tumorais, induzir apoptose e modular a angiogênese, reforçando o potencial dessas moléculas em estratégias preventivas e terapêuticas (Kielbasa; Gadzala-Kopciuch; Buszewski, 2021).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A biofuncionalidade de proteínas ativas e peptídeos bioativos representa um campo de estudo dinâmico e promissor, com implicações significativas para a saúde humana. A diversidade estrutural e funcional dessas moléculas, que variam desde pequenos fragmentos de aminoácidos até complexas glicoproteínas, permite que elas desempenhem papéis cruciais em processos biológicos, incluindo a modulação do sistema imunológico, a proteção contra o estresse oxidativo, a regulação da pressão arterial e a inibição do crescimento de células patogênicas. A compreensão aprofundada de suas características, ocorrência e mecanismos de ação é fundamental para o desenvolvimento de novas estratégias terapêuticas e produtos alimentícios funcionais. A pesquisa contínua nesta área promete desvendar ainda mais o



potencial dessas moléculas para a promoção da saúde e prevenção de doenças, consolidando seu papel como componentes valiosos na nutrição e na medicina.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, A.K., LICHTMAN, A.H., E PILLAI, S. **Cellular and Molecular Immunology - 10th Edition** | Elsevier Shop. [S.l.: S.n.].
- AL SHAREEF, Rolan *et al.* Can artificial intelligence uncover the bioactive peptides' benefits for human health and knowledge? A narrative review. **Frontiers in Nutrition**, v. 12, p. 1698147, 15 dez. 2025. **Bioactive Components**. [S.l.: S.n.].
- BRANDTZAEG, Per. The mucosal immune system and its integration with the mammary glands. **The Journal of pediatrics**, v. 156, n. 2 Suppl, p. S8, 2010.
- BROGDEN, Kim A. Antimicrobial peptides: pore formers or metabolic inhibitors in bacteria? **Nature Reviews Microbiology**, v. 3, n. 3, p. 238–250, mar. 2005.
- BUTLER, John E. Bovine Immunoglobulins: A Review. **Journal of Dairy Science**, v. 52, n. 12, p. 1895–1909, 1 dez. 1969.
- DALIRI, Eric; OH, Deog; LEE, Byong. Bioactive Peptides. **Foods**, v. 6, n. 5, p. 32, 26 abr. 2017.
- DINARELLO, Charles A. Historical insights into cytokines. **European Journal of Immunology**, v. 37, n. S1, p. S34–S45, nov. 2007.
- DONG, Yufan *et al.* Regulatory Potential of Food-Derived Bioactive Peptides on Gut Microbiota: A New Perspective against Immune-Mediated Inflammatory Diseases. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 73, n. 28, p. 17403–17416, jul. 2025.
- ELAGAMY, E. I. *et al.* Purification and characterization of lactoferrin, lactoperoxidase, lysozyme and immunoglobulins from camel's milk. **International Dairy Journal**, v. 6, n. 2, p. 129–145, 1996.
- GARCÍA-MONTOYA, Isui Abril *et al.* Lactoferrin a multiple bioactive protein: An overview. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects**, v. 1820, n. 3, p. 226–236, mar. 2012.
- GAROFALO, Roberto P.; GOLDMAN, Armond S. Cytokines, chemokines, and colony-stimulating factors in human milk: the 1997 update. **Biology of the neonate**, v. 74, n. 2, p. 134–142, ago. 1998.
- H., Meisel; J., FitzGerald. Biofunctional Peptides from Milk Proteins: Mineral Binding and Cytomodulatory Effects. **Current Pharmaceutical Design**, v. 9, n. 16, p. 1289–1295, 1 jun. 2003.
- HANCOCK, Robert E. W.; SAHL, Hans-Georg. Antimicrobial and host-defense peptides as new anti-infective therapeutic strategies. **Nature Biotechnology**, v. 24, n. 12, p. 1551–1557, 11 dez. 2006.
- HARAGUCHI, Fabiano Kenji; DE ABREU, Wilson César; DE PAULA, Heberth. Proteínas do soro do leite: composição, propriedades nutricionais, aplicações no esporte e benefícios para a saúde humana. **Revista de Nutrição**, v. 19, n. 4, p. 479–488, 2006.
- HILL, Colin *et al.* The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. **Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology**, v. 11, n. 8, p. 506–514, 10 ago. 2014.

IBIETA, Gabriela *et al.* Bioactive peptides as functional food ingredients: Production, mechanisms of action, market trends, and future perspectives with emphasis on andean crops. **Journal of Functional Foods**, v. 135, p. 107109, 1 dez. 2025.

KIELBASA, Anna; GADZALA-KOPCIUCH, Renata; BUSZEWSKI, Boguslaw. Cytokines-Biogenesis and Their Role in Human Breast Milk and Determination. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 12, p. 6238, 2 jun. 2021.

KONTOPIDIS, G.; HOLT, C.; SAWYER, L. Invited Review: β -Lactoglobulin: Binding Properties, Structure, and Function. **Journal of Dairy Science**, v. 87, n. 4, p. 785–796, abr. 2004.

KORHONEN, Hannu. Milk-derived bioactive peptides: From science to applications. **Journal of Functional Foods**, v. 1, n. 2, p. 177–187, abr. 2009.

KORHONEN, Hannu; PIHLANTO, Anne. Bioactive peptides: Production and functionality. **International Dairy Journal**, v. 16, n. 9, p. 945–960, set. 2006.

KUSSENDRAGER, Klaas D.; VAN HOOIJDONK, A. C. M. Lactoperoxidase: physico-chemical properties, occurrence, mechanism of action and applications. **British Journal of Nutrition**, v. 84, n. S1, p. 19–25, 9 nov. 2000.

LKHAGVASUREN, Enkhhsaikh. Janeway's Immunobiology, 9th Edition. **Central Asian Journal of Medical Sciences**, v. 3, n. 1, p. 100–101, 25 fev. 2017.

MOHANTY, D. P. *et al.* Milk derived bioactive peptides and their impact on human health – A review. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 23, n. 5, p. 577–583, set. 2016.

MUTHUKUMARAN, M. Selva *et al.* A comprehensive review on health benefits, nutritional composition and processed products of camel milk. **Food Reviews International**, v. 39, n. 6, p. 3080–3116, 2023.

NAGPAL, Ravinder *et al.* Gut microbiome and aging: Physiological and mechanistic insights. **Nutrition and Healthy Aging**, v. 4, n. 4, p. 267–285, 15 jun. 2018.

ÖZHAN, Hasan Kutluay *et al.* Lactoperoxidase: Properties, Functions, and Potential Applications. **International journal of molecular sciences**, v. 26, n. 11, 1 jun. 2025.

PALMEIRA, Patricia *et al.* IgG Placental Transfer in Healthy and Pathological Pregnancies. **Clinical and Developmental Immunology**, v. 2012, p. 1–13, 2012.

PEREIRA, A. S. *et al.* **Metodologia de Pesquisa Científica**. 1ª ed. ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

PERMYAKOV, Eugene A.; BERLINER, Lawrence J. α -Lactalbumin: structure and function. **FEBS Letters**, v. 473, n. 3, p. 269–274, 19 maio 2000.

PLAYFORD, R. J. *et al.* Bovine colostrum is a health food supplement which prevents NSAID induced gut damage. **Gut**, v. 44, n. 5, p. 653–658, 1 maio 1999.

POWER, O.; JAKEMAN, P.; FITZGERALD, R. J. Antioxidative peptides: enzymatic production, in vitro and in vivo antioxidant activity and potential applications of milk-derived antioxidative peptides. **Amino**

Acids, v. 44, n. 3, p. 797–820, 12 mar. 2013.

RAGLAND, Stephanie A.; CRISS, Alison K. From bacterial killing to immune modulation: Recent insights into the functions of lysozyme. **PLOS Pathogens**, v. 13, n. 9, p. e1006512, 21 set. 2017.

ROBERFROID, Marcel *et al.* Prebiotic effects: metabolic and health benefits. **British Journal of Nutrition**, v. 104, n. S2, p. S1–S63, 1 ago. 2010.

RUIZ, Lorena; FERNÁNDEZ, Leónides; RODRÍGUEZ, Juan M. Immune factors in human milk. **Human Milk: Sampling and Measurement of Energy-Yielding Nutrients and Other Macromolecules**, p. 275–298, 1 jan. 2021.

SÁNCHEZ, Adrián; VÁZQUEZ, Alfredo. Bioactive peptides: A review. **Food Quality and Safety**, v. 1, n. 1, p. 29–46, 1 mar. 2017.

SEIFU, Eyassu; BUYS, Elna M.; DONKIN, E. F. Significance of the lactoperoxidase system in the dairy industry and its potential applications: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 16, n. 4, p. 137–154, abr. 2005.

SUPERTI, Fabiana. Lactoferrin from Bovine Milk: A Protective Companion for Life. **Nutrients**, v. 12, n. 9, p. 2562, 24 ago. 2020.

SVENSSON, M. *et al.* Conversion of α -lactalbumin to a protein inducing apoptosis. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 97, n. 8, p. 4221–4226, 11 abr. 2000.

TULIPANO, Giovanni. Role of Bioactive Peptide Sequences in the Potential Impact of Dairy Protein Intake on Metabolic Health. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 22, p. 8881, nov. 2020.

UDENIGWE, Chibuike C.; ALUKO, Rotimi E. Food Protein-Derived Bioactive Peptides: Production, Processing, and Potential Health Benefits. **Journal of Food Science**, v. 77, n. 1, 10 jan. 2012.

WALSTRA, P. *et al.* **Dairy Science and Technology**. [S.l.]: CRC Press, 2005.

ZAKY, Ahmed A. *et al.* Bioactivities, Applications, Safety, and Health Benefits of Bioactive Peptides From Food and By-Products: A Review. **Frontiers in nutrition**, v. 8, 20 jan. 2022.

REALIZAÇÃO:

Aurum
EDITORA

CNPJ: 589029480001-12
contato@aurumeditora.com
(41) 98792-9544
Curitiba - Paraná
www.aurumeditora.com