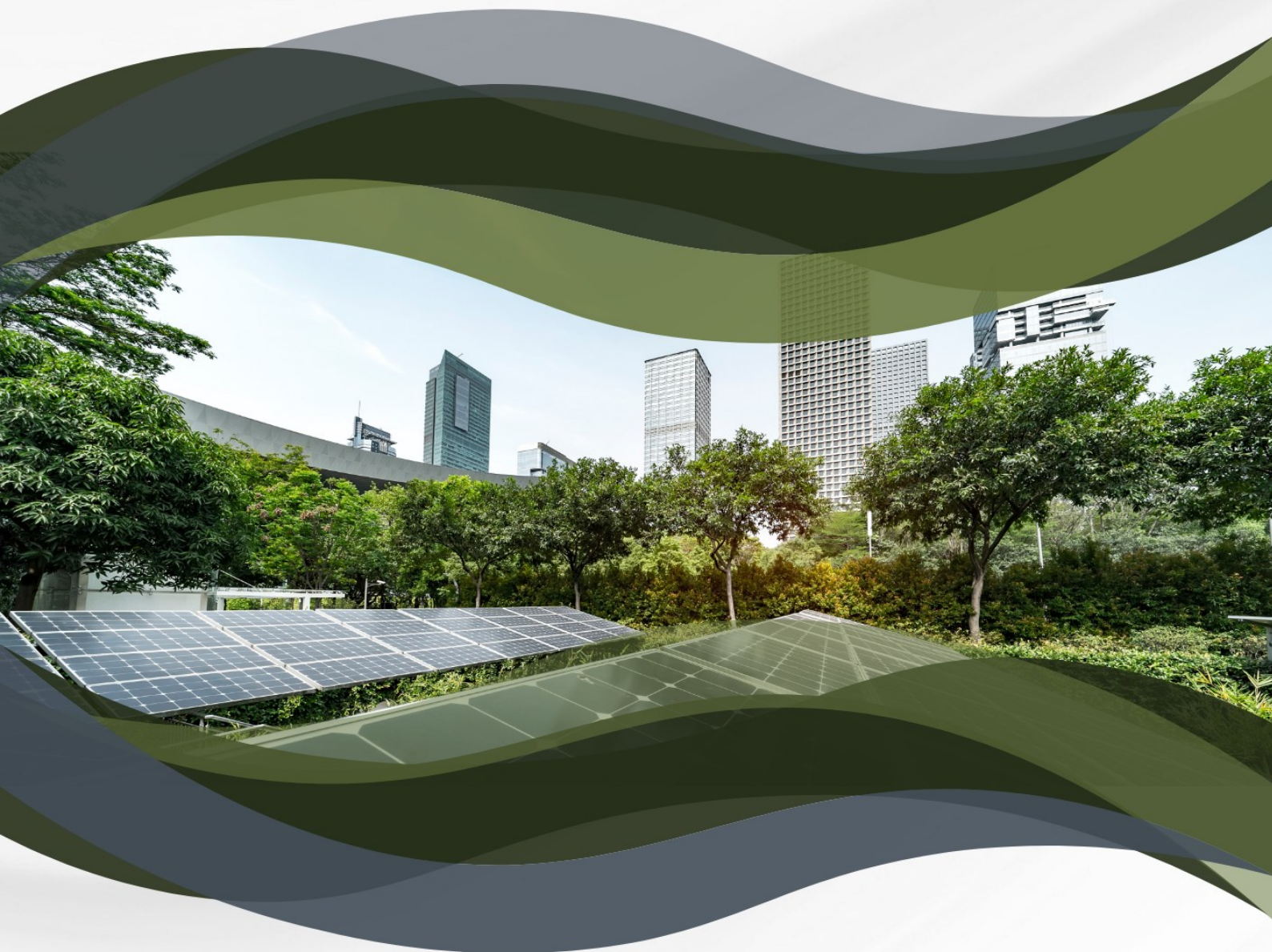


MEIO AMBIENTE E SOCIEDADE

ANÁLISES, DIÁLOGOS E CONFLITOS AMBIENTAIS

VOLUME IV



HIGOR COSTA DE BRITO
YÁSCARA MAIA ARAÚJO DE BRITO
ORGANIZADORES



AMPLLA
EDITORA

MEIO AMBIENTE E SOCIEDADE

ANÁLISES, DIÁLOGOS E CONFLITOS AMBIENTAIS

VOLUME IV



HIGOR COSTA DE BRITO
YÁSCARA MAIA ARAÚJO DE BRITO
ORGANIZADORES



AMPLLA
EDITORA



2025 - Ampla Editora

Copyright © Ampla Editora

Editor Chefe: Leonardo Tavares

Design da Capa: Ampla Editora

Meio ambiente e sociedade: análises, diálogos e conflitos ambientais – Volume IV está licenciado sob CC BY 4.0.



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

ISBN: 978-65-5381-325-0

DOI: 10.51859/ampla.mas5450-0

Ampla Editora

Campina Grande – PB – Brasil
contato@amplaeditora.com.br
www.amplaeditora.com.br



2025

CONSELHO EDITORIAL

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

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

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



2025 - Ampla Editora

Copyright © Ampla Editora

Editor Chefe: Leonardo Pereira Tavares

Design da Capa: Ampla Editora

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

M514

Meio ambiente e sociedade: análises, diálogos e conflitos ambientais /
Organização de Higor Costa de Brito, Yáscara Maia Araújo de Brito. – Campina
Grande/PB: Ampla, 2025.

(Meio ambiente e sociedade, V. 4)

Livro em PDF

ISBN 978-65-5381-325-0

DOI 10.51859/ampla.mas5450-0

1. Sustentabilidade e meio ambiente. I. Brito, Higor Costa de (Organizador). II. Maia,
Yáscara Maia Araújo (Organizadora). III. Título.

CDD 363.7

Índice para catálogo sistemático

I. Sustentabilidade e meio ambiente

Ampla Editora

Campina Grande – PB – Brasil
contato@amplaeditora.com.br
www.amplaeditora.com.br



2025

PREFÁCIO

O debate ambiental contemporâneo deixou de ser apenas uma discussão sobre “preservação da natureza” e passou a ocupar, de modo incontornável, o centro das dinâmicas sociais, econômicas, tecnológicas e políticas. A forma como as sociedades produzem, consomem, urbanizam, descartam, mobilizam energia, transformam paisagens e se relacionam com os territórios tem implicações diretas sobre a saúde coletiva, a segurança hídrica, a estabilidade climática, a biodiversidade, a qualidade do ar, do solo e da água, bem como sobre a distribuição de riscos e benefícios entre grupos sociais.

Este livro reúne trabalhos que, embora diversos em objetos, escalas e métodos, convergem para a necessidade de produzir conhecimento capaz de iluminar tensões reais entre sustentabilidade, produção, infraestrutura, saúde e justiça socioambiental. Ao longo dos capítulos, emergem conflitos explícitos e implícitos entre a geração de resíduos e a capacidade de gestão urbana; entre a demanda por energia e a urgência de transição para fontes menos impactantes; entre a expansão de atividades produtivas e a preservação de ecossistemas; entre inovação tecnológica e seus custos materiais; entre o espaço construído e o desempenho ambiental de materiais e edificações; entre vulnerabilidades históricas e a intensificação de riscos no semiárido; entre o ambiente e a saúde, no amplo espectro das exposições e agravos.

A obra dialoga com agendas científicas e políticas que vêm ganhando centralidade nas últimas décadas, como a economia circular, a valorização energética de resíduos, a transição energética, a química verde, a sustentabilidade em cadeias produtivas, o enfrentamento da desertificação e a interface ambiente-saúde. Ainda que esses temas sejam frequentemente tratados de forma compartimentalizada, os capítulos aqui reunidos contribuem para uma leitura mais conectada, ao evidenciar que soluções ambientais são, em grande medida, soluções sociotécnicas; pois dependem de governança, viabilidade econômica, cultura, capacidades institucionais, adesão social, planejamento e avaliação criteriosa de impactos.

Que este volume seja lido como convite ao diálogo que reconheça a existência de conflitos, explicita escolhas e seus efeitos, e favoreça a construção de soluções ambientalmente responsáveis e socialmente justas.

Higor Costa de Brito

SUMÁRIO

CAPÍTULO I. GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E GERAÇÃO DE ENERGIA: O POTENCIAL DO BIOGÁS EM ATERROS.....	10
CAPÍTULO II. BIODIGESTOR CASEIRO: OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE BAIXO CUSTO PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOFERTILIZANTE	29
CAPÍTULO III. GESTÃO INTELIGENTE DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS	43
CAPÍTULO IV. APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM CONCRETOS COM ADIÇÕES MINERAIS: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL	57
CAPÍTULO V. TRANSFORMAÇÃO SOCIAL E SUSTENTABILIDADE: UM RELATO DE EXPERIÊNCIA SOBRE TECNOLOGIAS RENOVÁVEIS IMPLANTADAS NO SÍTIO FURNAS, MONTADAS-PB E NO SÍTIO BENEFÍCIO, ESPERANÇA-PB	72
CAPÍTULO VI. ABORDAGENS DE QUÍMICA VERDE NA INDÚSTRIA FARMACÊUTICA: PRINCÍPIOS, DESAFIOS E PERSPECTIVAS	91
CAPÍTULO VII. PICADAS QUE ALERTAM: PANORAMA EPIDEMIOLÓGICO DOS ACIDENTES PROVOCADOS POR ESCORPIÕES E ARANHAS NO PIAUÍ (2013–2023)	100
CAPÍTULO VIII. ECOLOGIA DA CAATINGA NO SEMIÁRIDO: UMA REVISÃO INTEGRATIVA.....	120
CAPÍTULO IX. DESERTIFICAÇÃO E AGRICULTURA FAMILIAR NO SEMIÁRIDO PARAIBANO: PERCEPÇÕES, DESAFIOS E CAMINHOS PARA A SUSTENTABILIDADE.....	127
CAPÍTULO X. TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA APLICADA NA INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FACHADAS.....	140
CAPÍTULO XI. REVISANDO AS NORMAS ASTM G148-97 E ISO 17081:2004: UMA PERSPECTIVA CRÍTICA E EXPERIMENTAL SOBRE A AVALIAÇÃO DA DIFUSIVIDADE DE HIDROGÊNIO EM METAIS E LIGAS	156

GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E GERAÇÃO DE ENERGIA: O POTENCIAL DO BIOGÁS EM ATERROS

URBAN SOLID WASTE MANAGEMENT AND ENERGY GENERATION: THE POTENTIAL OF BIOGAS IN LANDFILLS

DOI: 10.51859/ampla.mas5450-1

Maria Eduarda Leite da Silva ¹
João Paulo Dantas de Carvalho ²
Anderson Alberto Pinto Torres ²

¹ Graduado do curso Superior de Sistemas de Energias Renováveis. Universidade Estadual da Paraíba – UEPB

² Professor do Departamento de Agrárias e Ambiental Universidade Estadual da Paraíba – UEPB

RESUMO

A gestão inadequada de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) configura-se como um dos principais desafios socioambientais globais. Neste cenário, o aterro sanitário é reconhecido como uma alternativa eficiente e ambientalmente sustentável para a disposição final dos rejeitos. O presente estudo de revisão bibliográfica investigou a viabilidade do aproveitamento energético do biogás, gerado pela decomposição anaeróbia dos RSU, em aterros sanitários, analisando os fatores técnicos, econômicos e ambientais inerentes ao processo de captação e conversão. A pesquisa ilustrou as etapas de projeto de um aterro, desde sua concepção até a recuperação e utilização do biogás como fonte de energia limpa. Adicionalmente, o estudo destacou o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que credencia o aproveitamento do biogás como uma estratégia primária para a mitigação das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE). Concluiu-se que os aterros sanitários, ao integrarem a captação de biogás para geração de energia, representam uma solução economicamente viável e ambientalmente correta, contribuindo para a recuperação ambiental e a redução dos impactos negativos associados à disposição final de RSU.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos. Aterro Sanitário. Biogás. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

ABSTRACT

Inadequate management of Municipal Solid Waste (MSW) is one of the main global socio-environmental challenges. In this scenario, sanitary landfills are recognized as an efficient and environmentally sustainable alternative for the final disposal of waste. This literature review investigated the feasibility of energy recovery from biogas, generated by the anaerobic decomposition of MSW, in sanitary landfills, analyzing the technical, economic, and environmental factors inherent in the capture and conversion process. The research illustrated the design stages of a landfill, from its conception to the recovery and use of biogas as a clean energy source. Additionally, the study highlighted the Clean Development Mechanism (CDM), which accredits the use of biogas as a primary strategy for mitigating Greenhouse Gas (GHG) emissions. It was concluded that sanitary landfills, by integrating biogas capture for energy generation, represent an economically viable and environmentally sound solution, contributing to environmental recovery and reducing the negative impacts associated with the final disposal of MSW (Municipal Solid Waste).

Keywords: Solid waste. Sanitary landfill. Biogas. Clean Development Mechanism (CDM).

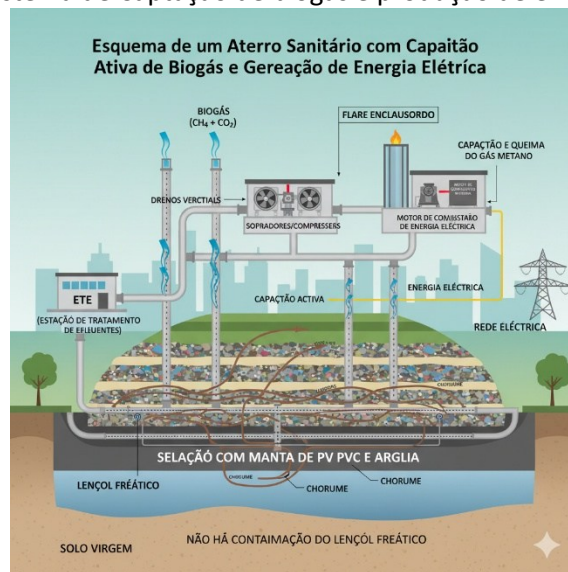
1. INTRODUÇÃO

A gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é um dos desafios ambientais mais prementes da sociedade contemporânea, com profundas implicações na saúde pública e no meio ambiente. A disposição inadequada dos RSU em lixões e aterros controlados resulta na contaminação de corpos hídricos (lixiviado) e na emissão descontrolada de gases, principalmente gases como metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2), amônia (NH_3) e gás sulfídrico (H_2S); destes o metano é o importante gás de efeito estufa (GEE) e é o principal componente do gás de aterro sanitário, representando cerca de 40% a 50% do total de gases emitidos (OLIVEIRA & SANTOS, 2017). Em contrapartida, o aterro sanitário representa a alternativa mais segura e ambientalmente controlada para a disposição final dos rejeitos, pois incorpora sistemas de tratamento de chorume e de captação de gases (Silva, 2011).

Durante a decomposição anaeróbia da matéria orgânica nos aterros sanitários, é gerado o biogás, uma mistura gasosa composta majoritariamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). O metano é um Gás de Efeito Estufa (GEE) com um potencial de aquecimento global significativamente maior que o CO_2 . A liberação descontrolada deste gás contribui diretamente para as mudanças climáticas, o que transforma o biogás, quando recuperado, em um recurso valioso. A captação e o aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica (Figura 1) permitem, simultaneamente, mitigar a emissão de GEE e prover uma fonte de energia renovável (Salomon, 2007; Silva, 2010), configurando-se como uma tecnologia de duplo benefício.

A viabilidade do aproveitamento energético do biogás é amplamente reforçada pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Integrante do Protocolo de Quioto, o MDL oferece incentivos econômicos (Créditos de Carbono) a projetos que promovem a redução de emissões e o desenvolvimento sustentável (Silva & Costa, 2013). Projetos de geração de energia a partir de biogás de aterro sanitário se enquadram no MDL, tornando-se atraentes do ponto de vista econômico e consolidando-se como uma solução técnica para o tratamento de resíduos. Dessa forma, o aproveitamento do biogás atende tanto à necessidade de melhoria na gestão de RSU quanto à urgência da transição energética.

Figura 1: Sistema de Captação de biogás e produção de energia elétrica



Fonte: Autoria Própria

Projetos de geração de energia a partir de biogás de aterro sanitário se enquadram no MDL, tornando-se atraentes do ponto de vista econômico e consolidando-se como uma solução técnica para o tratamento de resíduos. Dessa forma, o aproveitamento do biogás atende tanto à necessidade de melhoria na gestão de RSU quanto à urgência da transição energética.

A problemática central desta análise reside na gestão ineficiente do passivo ambiental gerado pela disposição final do RSU, que culmina na emissão atmosférica descontrolada do metano, um Gás de Efeito Estufa com potencial de aquecimento global 28 vezes superior ao CO_2 . Neste cenário, este estudo estabelece-se pela urgência em transpor este passivo ambiental para um ativo energético. O desenvolvimento de projetos de recuperação de biogás em aterros sanitários não só mitiga os riscos ambientais e de segurança inerentes à presença do metano, mas também insere a geração de eletricidade a partir de uma fonte não convencional no sistema energético, promovendo a circularidade dos recursos e o cumprimento de metas de sustentabilidade energética e climática. Assim, este artigo tem como objetivo analisar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em aterros sanitários, consolidando o conhecimento sobre o ciclo do RSU, os processos de recuperação energética do biogás e o papel estratégico do MDL neste contexto.

2. METODOLOGIA

O presente estudo utilizou a revisão bibliográfica como metodologia central. Este método de pesquisa busca explicar um problema a partir de referências teóricas publicadas em documentos.

A pesquisa bibliográfica, conforme a abordagem adotada, não se restringe à repetição de conteúdos pré-existentes, mas sim, proporciona o exame de um tema sob novo enfoque, podendo gerar conclusões inovadoras.

O levantamento bibliográfico concentrou-se na viabilidade da implantação de um sistema de geração de energia a partir do biogás como alternativa para o tratamento de resíduos sólidos em aterros sanitários. O foco da busca foi em produções científicas da área ambiental.

Os materiais incluíram teses, dissertações, livros e artigos científicos, selecionados de bases de dados eletrônicas como BIREME, LILACS, SCIELO e IBGE, abrangendo publicações até o ano de 2024.

3. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) E DESTINAÇÃO

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 10004, define resíduos sólidos como resíduos nos estados sólidos ou semissólidos, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Incluem-se os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos, instalações de controle de poluição e líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgoto, ou exijam soluções técnicas economicamente inviáveis.

As normas: Resolução nº 005 / CONAMA, de 5 de agosto de 1993 – NBR 10.004 - BRASIL, 2004; classifica a origem dos resíduos em: Domiciliares, comerciais, públicos, Especiais, Resíduos Sólidos de Serviços de Saúde. Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos são classificados em dois grupos:

a) Resíduos Classe I: denominados perigosos, são os resíduos sólidos que, devido às suas características, podem apresentar riscos à saúde pública. As características que conferem periculosidade a um resíduo são a inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade (ou contaminantes);

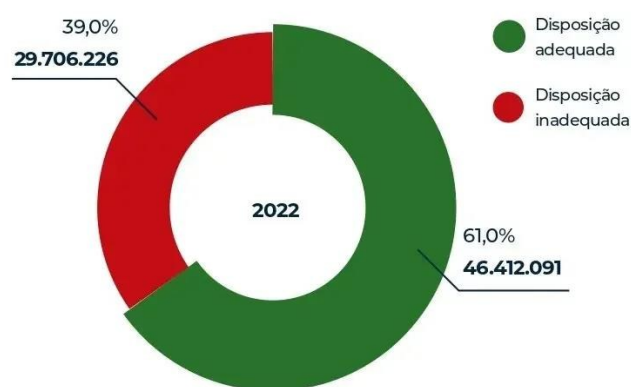
b) Resíduos Classe II: denominados não-perigosos, são os resíduos sólidos que não apresentam riscos ao ser humano e ao meio ambiente, sendo subdivididos em:

- Resíduos Classe II A: denominados inertes, são os resíduos sólidos que, submetidos a testes de solubilização, não tenham nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de águas, excetuando-se os padrões relativos ao aspecto, cor, turbidez e sabor;
- Resíduos Classe II B: denominados não inertes, são os resíduos que não se enquadram na Classe I ou na Classe II A, podendo ter propriedades, tais como, combustibilidade, biodegradabilidade, ou solubilidade em água.

Segundo a Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública E Resíduos Especiais (Abrelpe,2022) a disposição final do lixo no Brasil está representada na Figura 2.

O Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (GIRS) constitui um arcabouço de ações e estratégias destinadas ao manejo adequado dos resíduos, abrangendo desde a fase de geração até a destinação final, com ênfase na sustentabilidade trifásica: ambiental, social e econômica. Este conceito se harmoniza com os preceitos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela Lei 12.305/2010 no Brasil, visando um fluxo seguro e efetivo dos RSU que minimize os impactos sobre a saúde pública e o meio ambiente.

Figura 2: Disposição final do lixo no Brasil.



Fonte: ABRELPE (2022)

Programas de limpeza urbana são cruciais para promover a máxima redução na produção, o reaproveitamento e a reciclagem de materiais, além de direcionar a disposição final dos resíduos de forma sanitária e ambientalmente correta, resultando na proteção e

melhoria do ambiente, com auxílio na redução de custos do sistema (OLIVEIRA & PASQUAL, 1998).

Os serviços públicos compreendem a coleta e o transporte dos RSU até as áreas de tratamento e disposição final, englobando modalidades como:

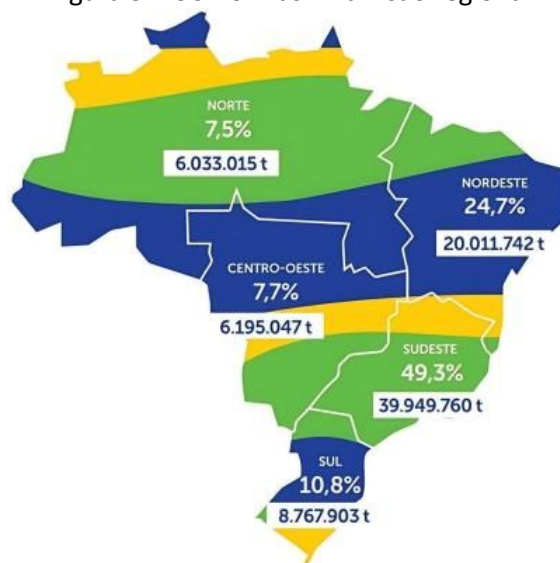
- Coleta domiciliar (regular ou convencional).
- Coleta de feiras, praias, calçadas e logradouros públicos⁸.
- Coleta especial (entulhos e outros).
- Coleta de resíduos de serviço de saúde.
- Coleta seletiva.

No que tange aos sistemas de disposição final, distinguem-se:

- Lixão (Descarga a céu aberto): Caracteriza-se pela inadequação, pois não possui tratamento nem proteção ao meio ambiente.
- Aterro Controlado: Similar ao lixão, mas com a cobertura dos resíduos por uma camada de terra. Contudo, carece de impermeabilização de base e sistema de tratamento de chorume.
- Aterro Sanitário: Representa a técnica adequada, utilizando procedimentos de engenharia para confinar os resíduos, minimizando impactos à saúde e ao meio ambiente, e mantendo controle e monitoramento ambiental.

Com base na variação desse índice, estima-se que a geração média de RSU per capita no Brasil tenha apresentado um crescimento discreto de menos de um ponto percentual, com cada habitante gerando, em média, 1,047 kg de RSU por dia em 2023. Ao multiplicar esse valor pela população estimada para o Brasil em 2023 (já aplicadas as correções feitas pelo IBGE em 2024), obtém-se uma geração anual estimada de aproximadamente 81 milhões de toneladas de RSU, o que equivale a mais de 221 mil toneladas de resíduos geradas todos os dias, ou cerca de 382 kg de RSU por habitante durante o ano (ABREMA, 2024). A geração regional de RSU em 2023 observada na Figura 3.

Figura 3: RSU no Brasil – divisão regional



Fonte: ABREMA (2024).

4. LIXÃO E ATERRO SANITÁRIO

4.1. LIXÃO

O lixão caracteriza-se como uma área de disposição final de resíduos sólidos sem qualquer preparo prévio do solo ou sistema de tratamento para efluentes líquidos, como o chorume. A ausência de impermeabilização permite que o chorume percole o solo, contaminando-o e atingindo o lençol freático, conforme ilustrado na Figura 4. Este ambiente insalubre fomenta a proliferação de vetores de doenças e expõe catadores a condições subumanas e riscos à saúde (LIXO, 2010).

Silva (2011) enfatiza que a falta de tratamento do solo e do chorume em lixões gera riscos ambientais, sociais e econômicos significativos. Os prejuízos ao meio ambiente incluem:

- Poluição visual: Degradação estética da paisagem e desvalorização econômica da área;
- Poluição do solo: Alteração das características físico-químicas do solo pelo chorume, tornando-o improdutivo e criando ambientes propícios para vetores de doenças;
- Poluição da água: Contaminação de mananciais superficiais e subterrâneos pelo chorume percolado;
- Poluição do ar: Emissão de gases como dióxido de carbono, metano e ácido sulfídrico, que geram riscos de explosões, doenças respiratórias e combustão da vegetação;

A Figura 4 oferece uma visão geral de um lixão a céu aberto, evidenciando a problemática (Silva, 2011).

Figura 4: Esquema e visão geral de um lixão a céu aberto



Fonte: Fonte: Lixo (2010); Paraíba lixão zero (2024) Adaptado.

Para mitigar esses impactos, Monteiro (2001) propõe um conjunto de ações para a recuperação de áreas degradadas por lixões, que incluem:

- Delimitação e cercamento preciso da área;
- Sondagens para determinar a espessura da camada de resíduos;
- Remoção do lixo excedente até uma espessura inferior a um metro;
- Recuperação da área escavada com solo natural da região;
- Execução de valetas perimetrais e poços para acúmulo e drenagem do chorume;
- Construção de poços verticais para a drenagem de gases;
- Cobertura com solo vegetal, plantio de espécies nativas e implantação de poços de monitoramento a montante e a jusante da área recuperada.

4.2. ATERRO SANITÁRIO

O aterro sanitário, conforme a ABNT NBR 8.419/1992, constitui uma técnica de disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no solo que, por meio de princípios de engenharia, confina os resíduos à menor área e volume possíveis, recobrando-os diariamente com terra. Este método visa a minimização de impactos ambientais e a proteção da saúde pública e segurança.

A Norma Técnica NBR 8419 (ABNT, 1984) estabelece critérios rigorosos para a implantação de aterros sanitários, incluindo:

- Localização em áreas não sujeitas a inundações;

- Manutenção de uma camada mínima de 1,5 m de solo insaturado entre a base do aterro e o nível mais alto do lençol freático, medido na época de maior precipitação;
- Exigência de solo de baixa permeabilidade (argiloso);
- Distância mínima de 200 metros de cursos d'água;
- Fácil acesso e arborização adequada nas redondezas para controle de erosão, poeira e odores;
- Construção de poços de monitoramento para detecção de vazamentos e contaminação do lençol freático;
- Monitoramento quadrimestral do efluente da lagoa de tratamento.

O projeto de um aterro sanitário deve obrigatoriamente incluir memorial descritivo, memorial técnico, estimativa de custos, cronograma, plantas e desenhos técnicos (NBR 8419/84).

Antes da implementação, todo aterro sanitário deve obter as licenças ambientais exigidas pelos órgãos competentes (municipal, estadual ou federal), conforme as resoluções do CONAMA (Elk, 2007)

Resolução CONAMA 01/1986: Define responsabilidades e critérios para a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) e estabelece a necessidade de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto do Meio Ambiente (RIMA). Resolução CONAMA 237/1997: Trata do Licenciamento Ambiental e regulamenta seus aspectos conforme a Política Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 308/2002: Fornece diretrizes para o Licenciamento Ambiental de sistemas de disposição final de RSU em municípios de pequeno porte, requerendo as seguintes licenças:

- Licença Prévia (LP): Avalia a localização e viabilidade do empreendimento com base no projeto básico;
- Licença de Instalação (LI): Concedida após aprovação dos estudos e projeto executivo, permitindo o início da obra;
- Licença de Operação (LO): Autoriza o funcionamento do aterro após a conclusão da obra, desde que esteja em conformidade com o projeto licenciado.

Elk (2007) detalha as etapas de concepção: estudos preliminares (caracterização municipal e diagnóstico de gestão de RSU) e escolha da área (considerando aspectos técnicos,

ambientais, operacionais e sociais, como levantamentos geológicos, geotécnicos e climatológicos).

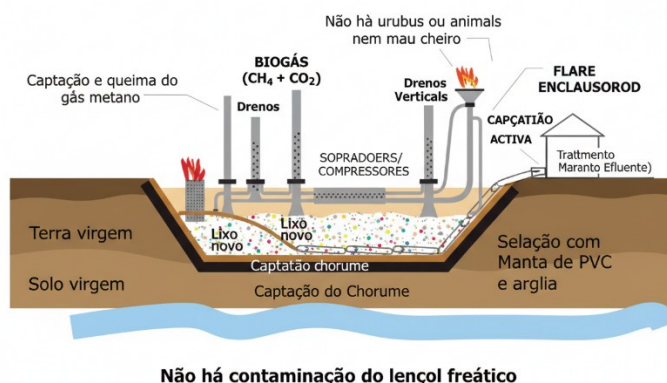
A operação de um aterro sanitário envolve o estudo da área, elementos de projeto, monitoramento e o uso futuro da área, que incluem (Elk, 2007):

- Estudo de área: Pré-seleção e levantamento de dados físico-bióticos, com critérios técnicos (ABNT NBR 10.157 e legislação), econômicos, sociais e políticos;
- Elementos de projeto: Sistemas de captação, armazenamento e tratamento de lixiviados e biogás, além de sistemas de impermeabilização superior e inferior;
- Sistemas de drenagem: Para águas superficiais (impedir entrada no aterro), de fundo e laterais (impermeabilização para evitar percolação de chorume) e de lixiviados (evitar acúmulo de chorume);
- Sistema de drenagem de gases: Rede eficaz para impedir a fuga de gases (metano) por meios porosos do subsolo;
- Cobertura intermediária e final: Diária, para eliminar vetores, reduzir formação de lixiviados, diminuir odores e controlar a saída de biogás;
- Monitoramento: Essencial para preservar o meio ambiente, garantir a segurança da obra e conservar os sistemas de drenagem de lixiviados durante e após a operação;
- Operação e uso futuro da área: Recebimento de resíduos seguindo um plano operacional simples e completo, conforme representado na Figura 5 (Elk, 2007)

Obladen et al. (2009) complementam com medidas de monitoramento abrangentes, como a qualidade do ar, poluição sonora, qualidade das águas (superficiais e subterrâneas), controle do solo, recuperação vegetal, preservação da fauna terrestre, ecossistemas aquáticos e o controle do efluente tratado.

Figura 5: Funcionamento de um aterro sanitário.

Esquema de um Aterro Sanitário com Captação e Tratamento de Chorume e Biogás



Fonte: Autoria Própria

5. BIOGÁS PRODUÇÃO, CAPTAÇÃO E APROVEITAMENTO

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2008), o biogás é definido como sendo: Um tipo de mistura gasosa de dióxido de carbono e metano, semelhante ao gás natural, mas com menor poder calorífico, produzido naturalmente em meio anaeróbico pela ação de bactérias em matérias orgânicas. A digestão anaeróbia de compostos orgânicos é um processo que ocorre de forma natural, com a ausência de oxigênio, onde os microrganismos, decompõe a matéria orgânica complexa, em frações menores para produzir uma mistura de gases contendo majoritariamente metano (55-70%), dióxido de carbono (30-45%) e traços de outros gases como H₂S, NH₃, H₂, N₂ (REICHERT, 2005). Esse processo complexo pode ser dividido em quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

Inicialmente, na hidrólise, polímeros orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídios) são quebrados em monômeros mais simples por ação enzimática. Em seguida, na acidogênese, esses monômeros são convertidos em ácidos orgânicos de cadeia curta (como ácido acético, propiônico e butírico), álcoois e gases (CO₂ e H₂), por bactérias acidogênicas. A terceira etapa, a acetogênese, envolve a conversão desses ácidos orgânicos e álcoois em acetato, CO₂ e H₂ por bactérias acetogênicas. Finalmente, na metanogênese, arqueas metanogênicas transformam o acetato e a mistura de CO₂ e H₂ em metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), componentes primários do biogás, concluindo o processo de estabilização da matéria orgânica (Kunz et al 2022).

A digestão anaeróbia pode ser afetada por diferentes fatores, os quais estão relacionados com o substrato, as características do biodigestor, bem como as condições de

operação. Se um determinado fator provoca desequilíbrio no processo, este se deve principalmente a uma maior sensibilidade das archaeas metanogênicas, que deixam de produzir o metano, ocasionando o aumento na concentração dos ácidos orgânicos voláteis e de outros produtos intermediários, inibindo ainda mais a produção do biogás (OLIVEIRA, 2009; MEYSTRE, 2007).

Segundo Kunz et al 2022, pode-se citar estas variáveis que afetam diretamente o processo de produção de biogás:

- Temperatura: Cada grupo de bactérias tem uma faixa de temperatura ótima (psicrofílica, mesofílica ou termofílica). Variações bruscas podem prejudicar o processo.
- pH: O nível de acidez é crítico. Ele deve ser mantido dentro de uma faixa específica (idealmente entre 6,5 e 8), especialmente durante as fases iniciais.
- Oxigênio: A biodigestão é um processo anaeróbio (sem oxigênio). A presença de oxigênio pode reduzir significativamente a atividade das bactérias metanogênicas.
- Substâncias tóxicas: A presença de substâncias tóxicas no material pode matar as bactérias e interromper o processo de produção de biogás.
- Homogeneidade e agitação: A agitação do substrato é importante para evitar a formação de camadas, garantir o contato uniforme dos microrganismos com a matéria orgânica e facilitar a liberação do biogás.
- Tempo de retenção: É o tempo que o material permanece no biodigestor. Deve ser ajustado para maximizar o rendimento e evitar que o material saia sem a decomposição completa.

O uso energético do biogás gerado em aterros sanitários representa uma estratégia promissora no Brasil para a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e mitigação das mudanças climáticas globais (Alves et al., 2008). A principal vantagem reside no aproveitamento de uma fonte de energia que, de outra forma, seria desperdiçada na atmosfera. Além disso, a atividade é classificada como um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), permitindo a obtenção e venda de Certificados de Emissões Reduzidas como Créditos de Carbono (Alves et al., 2008). Apesar de dados ainda serem insuficientes sobre a disposição final de resíduos no país, o potencial para projetos de biogás para geração de energia é notável (Alves et al., 2008).

A geração de biogás em aterros depende de múltiplos fatores, como umidade e composição dos resíduos. A taxa de geração atinge seu pico entre o primeiro e o segundo ano, decaindo progressivamente, mas podendo se estender por até 20 anos (Pecora et al., 2008). A queima do biogás oferece o benefício adicional de converter o metano (GEE potente) em dióxido de carbono, um gás com potencial de aquecimento global cerca de 20 vezes menor (Pecora et al., 2008). Uma estimativa conservadora mostra que uma tonelada de RSU produz cerca de 50 a 125 m³ de metano. A ausência de ar nos aterros, temperatura e umidade adequadas, e a disponibilidade de matéria orgânica criam um ambiente ideal para o desenvolvimento de bactérias anaeróbias responsáveis pela formação do biogás (Oliveira; Gomes, 2008).

A geração de energia a partir do biogás de aterros sanitários requer investimento e planejamento em instalações essenciais. No gerador, a combustão do biogás produz eletricidade que é então destinada à rede elétrica (Oliveira; Gomes, 2008).

Cada projeto de aproveitamento de biogás possui características específicas, influenciadas pela localização, investimento, necessidades energéticas e legislação (Ensinas et al., 2004). Existem dois tipos principais de sistemas de coleta de biogás:

- Sistema Passivo: Drena os gases para a atmosfera, evitando a emissão descontrolada na superfície e a migração para áreas vizinhas;
- Sistema Ativo: Utiliza exaustores e compressores e é empregado em projetos de aproveitamento energético do biogás.

Devido ao seu alto teor de metano, o biogás, possui diversas aplicações energéticas. Este produto pode ser utilizado como combustível em geradores para produção de eletricidade, produção de calor, iluminação e até mesmo insumo para indústria química (Manual para Aproveitamento de Biogás, 2009).

5.1. SISTEMA PARA EXTRAÇÃO E TRATAMENTO DO BIOGÁS NO ATERRO

Independentemente do sistema de extração, o biogás coletado frequentemente necessita de tratamento antes de ser utilizado. Este tratamento pode envolver a remoção de impurezas como sulfeto de hidrogênio (H₂S), umidade e siloxanos, que podem ser corrosivos ou danificar os equipamentos de geração de energia (MEYSTRE, 2007). Após a captação e, se necessário, o tratamento, o biogás podem ser queimados em um flare (para

eliminação segura do metano) ou direcionado para motores de combustão interna acoplados a geradores para a produção de energia elétrica.

Esta prática é particularmente crítica em projetos que visam a obtenção de créditos de carbono, pois previne a emissão de metano (CH_4) para a atmosfera em caso de falha nos sistemas de geração de energia, evitando a consequente perda desses créditos (Combustec Queimadores, 2013).

Os flares enclausurados, tipicamente construídos em aço carbono e isolados com fibra cerâmica, contam com queimadores internos fixados a um coletor inferior, que se interliga ao duto principal do biogás. Uma bifurcação neste duto direciona o gás tanto para os sistemas de geração de energia quanto para o flare (Combustec Queimadores, 2013). Este dispositivo assegura a combustão controlada do metano, transformando-o em dióxido de carbono, que possui um potencial de aquecimento global significativamente menor.

6. MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO (MDL) E VIABILIDADE

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é um instrumento jurídico-econômico concebido para mitigar a emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) na atmosfera, originário da mobilização internacional promovida pela Organização das Nações Unidas (ONU) para enfrentar as mudanças climáticas.

O Artigo 12 do Protocolo de Kyoto estabelece os procedimentos para a qualificação de projetos que visam gerar Reduções Certificadas de Emissão (RCE).

Os objetivos do MDL são duplos:

- Assistir as Partes não incluídas no Anexo I (países em desenvolvimento) a alcançarem o desenvolvimento sustentável e a contribuírem para o objetivo da Convenção.
- Auxiliar as Partes incluídas no Anexo I (países desenvolvidos) no cumprimento de seus compromissos quantificados de limitação e redução de emissões, conforme o Artigo 3º.

O MDL funciona incentivando países em desenvolvimento a implementar projetos de recuperação e preservação ambiental e tecnologia. As Partes não incluídas no Anexo I são beneficiadas por atividades de projetos que resultam em RCEs, enquanto as Partes incluídas no Anexo I podem utilizar essas RCEs para cumprir parte de seus compromissos de redução.

O MDL utiliza recursos de países desenvolvidos para auxiliar os em desenvolvimento, permitindo que os países poluidores (Anexo I) cumpram suas metas de forma mais econômica do que se implementassem os projetos em seu próprio território (Figueiredo, 2011).

A obtenção de Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) em projetos MDL segue um protocolo estruturado em seis fases sequenciais (Neto, 2009):

- **Concepção do Projeto:** Nesta fase, elabora-se o Documento de Concepção do Projeto (DCP), que descreve as atividades, qualifica os participantes, define as metodologias de cálculo para o cenário de referência e quantifica as reduções de GEE;
- **Validação:** Uma Entidade Operacional Designada (EOD) avalia o projeto para verificar a conformidade com os requisitos do MDL e a aprovação pela Autoridade Nacional Designada (AND), assegurando sua contribuição para o desenvolvimento sustentável;
- **Registro do Projeto:** Formaliza a aceitação do projeto como um empreendimento MDL válido;
- **Monitoramento da Implementação:** Os dados previstos no DCP são monitorados continuamente pelos participantes, com relatórios periódicos submetidos à EOD;
- **Verificação e Certificação dos Créditos de Carbono:** A EOD realiza uma verificação in loco para comprovar o cumprimento das metas de redução de GEE estabelecidas. Posteriormente, é emitida uma certificação escrita que atesta as reduções alcançadas em um período específico, conforme o DCP;
- **Emissão das RCE:** A fase final culmina na emissão das RCEs, que representam as reduções verificadas e certificadas, tornando-as passíveis de comercialização.

De acordo com Abreu (2009) o Brasil se destaca globalmente na experiência com projetos de transformação de biogás de aterro em energia, sendo que muitos deles são desenvolvidos sob o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Embora os projetos de aterros sanitários em validação/aprovação representassem apenas 10% do total de atividades de MDL em 2008, esses 27 projetos colaborariam com uma expressiva redução de 24% na emissão anual de Gases de Efeito Estufa (GEE) Limiro (2008).

A captação de biogás para geração de energia se configura como uma solução eficiente, pois combina a despoluição e o cumprimento das determinações da ONU/Protocolo de Kyoto com o MDL, gerando benefícios triplos:

- **Ambiental:** A coleta e combustão do biogás reduzem as emissões de GEE.

- Social: Diminuição dos volumes de resíduos sólidos e geração de vagas de emprego.
- Econômico: Ganhos financeiros com a venda de créditos de carbono (RCEs) e atração de investimento estrangeiro.

Para projetos de MDL, os aterros sanitários obtêm ganhos duplos: pela incineração do metano (que exige drenos com capacidade máxima de carga) e pela geração de energia, o que requer a instalação de subestação elétrica para conexão ao sistema de distribuição. Contudo, a escolha da alternativa de aproveitamento deve ponderar a viabilidade econômica com os impactos ambientais (MONTILHA, 2005).

7. CONCLUSÕES

O estudo concluiu que a gestão eficiente e correta dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) viabiliza o aproveitamento vantajoso do potencial energético do biogás.

Os aterros sanitários são confirmados como alternativas benéficas para a disposição final dos resíduos:

- Eles permitem a captação dos gases gerados.
- O metano é transformado em dióxido de carbono por combustão, reduzindo a emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE).
- O biogás é uma fonte de energia alternativa, renovável e de fácil acesso.

A implantação de um sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás é considerada totalmente eficaz e apropriada para o tratamento de RSU. Foi demonstrada a eficiência do biogás na redução de gases poluentes na atmosfera e na consequente diminuição do impacto ambiental.

Por fim, o trabalho incentiva o desenvolvimento de projetos ambientais que visem a redução climática global, pois esses empreendimentos podem gerar projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Estes, ao serem vendidos como Créditos de Carbono, proporcionam ganhos econômicos, sociais e, principalmente, ambientais.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8.849**: Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1985.

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8.419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992. ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004**: Resíduos Sólidos. Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. São Paulo: Abrelpe, 2023. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- ABREU, F. de. **Análise de Viabilidade Técnica e Econômica da Geração de Energia Através do Biogás de Lixo em Aterros Sanitários**. 2009. Dissertação (Mestrado em Fenômenos de Transporte) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- ALVES, L.; COLARES, R.; UTURBEY, W. **As atratividades ambientais e econômicas do uso do biogás produzido pelo aterro sanitário de Belo Horizonte para geração de energia elétrica**. 2008. Belo Horizonte: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos: 2008.
- BRITTO, M. C. S. **Taxa de Emissão de Biogás e Parâmetros de Biodegradação de Resíduos Sólidos Urbanos no Aterro Metropolitano Centro**. 2006. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006.
- BOHRZ, G. I. **Geração de metano em lagoa anaeróbia: um estudo de caso em abatedouro de bovinos**. 2010. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2010.
- CRUZ, S. R. S. **Mercado de carbono em aterros sanitários como instrumento para a inovação em serviços públicos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Política Científica e Tecnológica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas 2012.
- CETESB - **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos**. São Paulo: CETESB, 2011.
- CENBIO – **Centro Nacional de Referência em Biomassa**. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.usp.br/aunantigo/unid?u=cenbio>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- COELHO, S. T.; MONTEIRO, M. R. **Potencial energético do biogás no Brasil**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 9, n. 1, p. 30–40, 2020.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, v. 5, 1997. 245 p.
- ELK, A. G. H. P. van. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo Aplicado a Resíduos Sólidos. Redução de Emissões na Disposição Final**. Rio de Janeiro: 2007.
- FARIA, R. A. P. **Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto – estudo de caso**. 2012. 63 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

- FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização de Biogás de Aterro Sanitário para Geração de Energia Elétrica** – Estudo de Caso. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- GOMES, L. A.; LIMA, R. S. **Sistemas de captação de biogás em aterros sanitários: avaliação e perspectivas energéticas**. Revista Engenharia & Meio Ambiente, v. 17, n. 1, p. 65–74, 2020.
- LIMIRO, D. **Créditos de Carbono - Protocolo de Kyoto e Projetos de MDL**. Goiânia: Juruá Editora, 2008.
- LOUZADA, A. G. **Avaliação da atividade metanogênica específica de lodos com condicionamento hidrolítico provenientes do sistema UASB + BFs**. 2006. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2006.
- MME - Ministério de Minas e Energia. **Levantamento do potencial de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento de dejetos animais no Brasil**. Brasília: 2008.
- MONTEIRO, J. H. et. al. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.
- NETO, A. L. **Contrato de créditos de carbono - Análise crítica das mudanças climáticas**. Maringá: Juruá Editora, 2009.
- OBLADEN, N. L.; OBLADEN, N. T. R.; BARROS, K. R. de. **Guia para elaboração de Projetos de Aterros Sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos**. Volume III. 2009.
- OLIVEIRA, S. de; PASQUAL, A. **Manual de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em Médias e Pequenas Comunidades**. São Paulo: UNESP, 1998.
- OLIVEIRA, P. H.; SANTOS, M. A. **Resíduos sólidos e seus impactos ambientais**. São Paulo: Atlas, 2017.
- OLIVEIRA, M. A.; LOPES, R. M. **Gestão de resíduos sólidos: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Atlas, 2018.
- PODER360. **Brasil tem 41,5% do lixo descartado de forma inadequada em 2023**. 21 mar. 2024. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/podersustentavel/brasil-tem-415-do-lixo-descartado-de-forma-inadequada-em-2023/>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- MCT- **Ministério da Ciência e Tecnologia. Protocolo de Kyoto**. Brasília: 1997. REIS, L. B. dos; FADIGAS, E. A. F. A.; CARVALHO, C. E. **Energia, Recursos Naturais e a Prática do Desenvolvimento Sustentável**. 2. ed. São Paulo: Manole 2012.
- REICHERT, G. A. **Aplicação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: uma revisão**. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande, 2005. 16 p.

- MONNET, F. **An introduction to anaerobic digestion of organic wastes. Remade Scotland:** 2003. 48 p.
- SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade.** 2007. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá, 2007.
- SANTOS, A. F. da S. **Estudo de viabilidade de aplicação do biogás no ambiente urbano.** 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Administração) – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2009. SILVA, N. L. da S. **Aterro sanitário para resíduos sólidos urbanos – RSU - . Matriz para seleção da área de implantação.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2011.
- SILVA, W. R. da. **BIOGÁS: Potencialidade dos aterros sanitários do estado do Paraná.** 2010. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2010.
- SILVA, T. H.; COSTA, M. A. **Créditos de carbono e desenvolvimento sustentável: análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no Brasil.** Revista de Meio Ambiente e Sustentabilidade, v. 10, n. 1, p. 22–34, 2021.
- SILVA, A. R.; PEREIRA, L. M. **Biogás e desenvolvimento sustentável: perspectivas para o MDL no Brasil.** Revista de Políticas Ambientais, v. 11, n. 2, p. 55–63, 2021.

CAPÍTULO II

BIODIGESTOR CASEIRO: OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE BAIXO CUSTO PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOFERTILIZANTE

BIODIGESTER FOR DOMESTIC USE IN: LOW-COST SYSTEM OPTIMIZATION FOR BIOGAS AND BIOFERTILIZER PRODUCTION

DOI: 10.51859/ampla.mas5450-2

Rafael Estrela de Oliveira ¹
João Paulo Dantas de Carvalho ²
Anderson Alberto Pinto Torres ²

¹ Graduado do curso Superior de Sistemas de Energias Renováveis. Universidade Estadual da Paraíba – UEPB

² Professor do Departamento de Agrárias e Ambiental Universidade Estadual da Paraíba – UEPB

RESUMO

Esta investigação objetivou analisar o desempenho operacional e a eficiência de um biodigestor anaeróbico de escala doméstica, com capacidade nominal de 30 litros, implantado no laboratório de biotecnologia da Unidade Acadêmica de Sousa-PB da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). O estudo focou na aplicabilidade da tecnologia em contextos com restrições de infraestrutura, como o semiárido brasileiro, e na otimização da produção energética a partir de resíduos orgânicos. O substrato empregado consistiu em uma codigestão de esterco bovino e restos de alimentos, complementada pela adição de inóculo proveniente de um biodigestor funcional, estratégia fundamental para acelerar o estabelecimento de uma microbiota anaeróbica estável. Durante a fase de monitoramento, foram acompanhados parâmetros operacionais, como o pH, a composição do biogás além da integridade estrutural do reator em diversas etapas de funcionamento. A operação inicial revelou falhas de vedação e acúmulo de pressão, exigindo a adoção de medidas técnicas corretivas, como o reforço das junções do equipamento e a implementação de um gasômetro artesanal, elementos cruciais para a segurança e a retenção eficiente do biogás. O produto gasoso demonstrou excelente qualidade, com concentrações de metano variando entre 57,5% e 87,5%. A confirmação do potencial energético foi obtida por meio de um teste de combustão, onde a chama apresentou coloração azul clara. Conclui-se que biodigestores de pequeno porte são uma solução robusta e economicamente viável para a geração descentralizada de energia renovável e o manejo sustentável de resíduos em áreas rurais e semiáridas, contribuindo significativamente para a sustentabilidade energética e a fertilidade agrícola.

Palavras-chave: Biodigestores. Biogás. Biofertilizante. Energia Renovável.

ABSTRACT

This investigation aimed to analyze the operational performance and efficiency of a domestic-scale anaerobic biodigester, with a nominal capacity of 30 liters, implemented in the biotechnology laboratory of the Sousa-PB Academic Unit of the State University of Paraíba (UEPB). The study focused on the applicability of the technology in contexts with infrastructure constraints, such as the Brazilian semi-arid region, and on optimizing energy production from organic waste. The substrate used consisted of a co-digestion of bovine manure and food scraps, complemented by the addition of inoculum from a functional biodigester, a fundamental strategy to accelerate the establishment of a stable anaerobic microbiota. During the monitoring phase, operational parameters such as pH, biogas composition, and the structural integrity of the reactor were monitored at various stages of operation. The initial operation revealed sealing failures and pressure buildup, requiring the adoption of corrective technical measures, such as reinforcing the equipment joints and implementing a homemade gasometer, crucial elements for safety and efficient biogas retention. The gaseous product demonstrated excellent quality, with methane concentrations ranging from 57.5% to 87.5%. The energy potential was confirmed through a combustion test, where the flame showed a light blue colour. It is concluded that small-scale biodigesters are a robust and economically viable solution for the decentralized generation of renewable energy and the sustainable management of waste in rural and semi-arid areas, contributing significantly to energy sustainability and agricultural fertility.

Keywords: Biodigester. Biogas. Biofertilizer. Renewable energy.



1. INTRODUÇÃO

O panorama brasileiro é demarcado por uma complexa interseção de desafios socioeconômicos e ambientais que exigem o desenvolvimento de soluções tecnológicas inovadoras e sustentáveis. Neste contexto, o emprego da biodigestão anaeróbica (DA) configura-se como uma alternativa promissora. Tal tecnologia não apenas possibilita a geração de energia renovável, mas também impulsiona o desenvolvimento local e aprimora a gestão ambiental (CIBIOGÁS, 2020; DIACONIA, 2020).

A utilização de biodigestores para o processamento de resíduos orgânicos é reconhecida internacionalmente como uma estratégia eficiente para o manejo de resíduos e a geração de energia. No Brasil, particularmente nas áreas rurais, essa solução adquire relevância crescente, dado que o biogás, resultante da decomposição microbiana da matéria orgânica na ausência de oxigênio, constitui uma fonte energética significativa para essas regiões (XAVIER; LUCAS, 2010; DEGANUTTI et al., 2002).

Adicionalmente, SANTOS e SILVA (2020) destacam o impacto positivo dos biodigestores na redução dos custos energéticos para famílias de baixa renda, evidenciando o potencial transformador da tecnologia. A introdução eficaz dessas inovações transcende a dimensão estritamente técnica, abrangendo aspectos socioeconômicos e ambientais que se integram ao cotidiano das comunidades. Projetos de capacitação e educação, conforme evidenciado por CUNHA e LIMA (2021), demonstram que o sucesso na implementação de biodigestores depende da inclusão e do engajamento comunitário.

Essa abordagem participativa não apenas assegura a eficácia operacional do sistema, mas também fomenta a autonomia local. No ambiente específico do Semiárido brasileiro, os biodigestores emergem como uma opção viável e econômica para a produção de biogás e biofertilizante. Inovações como o Biodigestor “Sertanejo” têm demonstrado capacidade de promover o desenvolvimento sustentável, auxiliando na redução dos impactos do desmatamento e das alterações climáticas (DIACONIA, 2020).

O papel dos biodigestores na mitigação de impactos ambientais é crucial, especialmente no combate ao desmatamento. Ao fornecer o biogás como substituto para a lenha e o carvão vegetal, há uma diminuição da pressão extrativista sobre os ecossistemas naturais (DIACONIA, 2020). Além disso, a DA é fundamental na captação e aproveitamento do metano, um gás com potencial de aquecimento global significativamente superior ao do

dióxido de carbono, evitando sua liberação direta na atmosfera. Este método não só reduz as emissões de gases de efeito estufa, mas também incentiva o uso eficiente de resíduos orgânicos, diminuindo a dependência de combustíveis fósseis e fertilizantes químicos. O biogás é o produto da biodigestão anaeróbica, gerado por uma cascata microbiológica. Sua composição típica, embora dependa do substrato, consiste em 50% a 75% de CH_4 e 25% a 45% de CO_2 , além de traços de outros gases como hidrogênio H_2 , Amônia NH_3 e sulfeto de hidrogênio H_2S (CIBIOGÁS, 2020).

A comparação do biogás com outros tipos de combustíveis energéticos facilita a análise de sua viabilidade para diversas aplicações, especialmente em áreas com grande disponibilidade de resíduos orgânicos e demanda por soluções energéticas sustentáveis e econômicas. Embora o biogás tenha um poder calorífico inferior ao do gás natural, gasolina e gás liquefeito de petróleo (GLP), ele pode ser uma alternativa vantajosa do ponto de vista econômico e ambiental, especialmente quando produzido localmente a partir de resíduos orgânicos disponíveis. Para compreender de maneira mais aprofundada o potencial energético do biogás, analisa-se medida do poder calorífico, que determina a energia liberada ao se queimar uma determinada unidade de volume ou massa. O biogás, que apresenta uma concentração de metano em torno de 60%, tem um poder calorífico em torno de 22 MJ/m^3 . Em comparação, o gás natural possui cerca de 35 MJ/m^3 , enquanto a gasolina apresenta aproximadamente 44 MJ/kg (CIBIOGÁS, 2020). A Tabela mostra algumas equivalências práticas do biogás em relação a diferentes combustíveis.

Tabela 1: Equivalência Energética do biogás com outras fontes energéticas

Combustível	Poder Calorífico (MJ)	Equivalência com 1 m^3 de Biogás (60% CH_4)
Eletricidade (geração)	Gás Natural $3,6 \text{ MJ/kWh}$	35 MJ/m^3 $1 \text{ kWh} \approx 0,7 \text{ m}^3$ de biogás
Gás Natural	35 MJ/m^3	1 m^3 de GN $\approx 1,6 \text{ m}^3$ de biogás
Gasolina	44 MJ/kg	1 litro de gasolina $\approx 1,7 \text{ m}^3$ de biogás
Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	46 MJ/kg	1 kg de GLP $\approx 2 \text{ m}^3$ de biogás

Fonte: Adaptado de Xavier e Lucas (2010), CIBIOGÁS (2020) e Silveira (2017)

O metano, devido ao seu alto poder calorífico, estabelece o biogás como uma fonte renovável passível de ser utilizada para cocção, aquecimento e geração de eletricidade,

evidenciando o papel central dos biodigestores na sustentabilidade energética e ambiental (XAVIER e LUCAS, 2010). A necessidade de inovações tecnológicas que promovam a utilização sustentável dos recursos naturais no Semiárido brasileiro é premente. Neste contexto, o biodigestor caseiro se apresenta como uma alternativa acessível para comunidades rurais com dificuldades no acesso a fontes de energia convencionais (DIACONIA, 2020; CIBIOGÁS, 2020).

O metano gerado é uma alternativa eficaz ao Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e à lenha, diminuindo a dependência de combustíveis fósseis e mitigando impactos ambientais. Por fim, este estudo visa detalhar o funcionamento de um biodigestor de uso doméstico, instalado na Unidade Acadêmica de Sousa da UEPB. Assim, o trabalho objetiva a avaliação da eficácia do sistema na geração de biogás e a identificação dos principais fatores que influenciam a atividade microbiana em cada fase da digestão anaeróbica. Adicionalmente, a pesquisa aborda os desafios operacionais associados ao manejo do biodigestor, como a manutenção do pH ideal e a prevenção de vazamentos, que impactam diretamente a geração de biogás e a segurança do sistema.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado no campus IV da UEPB na Unidade Acadêmica em Sousa-PB, região de clima semiárido. A construção do biodigestor foi fundamentada no modelo proposto por Ferreira (2024), com estrutura de polietileno e conexões em PVC, sendo um projeto de baixo custo e fácil replicação, ideal para a realidade de pequenos produtores e comunidades rurais.

2.1. BIODIGESTOR

Reator anaeróbico examinado nesta pesquisa está alocado na Unidade Acadêmica Sousa-PB, Campus IV, da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), e possui uma capacidade volumétrica nominal de 30 litros. Este dispositivo foi originalmente concebido por Ferreira (2024) com a finalidade de estabelecer um protótipo artesanal utilizando materiais acessíveis e de baixo custo. O objetivo primário era oferecer uma solução sustentável e replicável para a produção de bioenergia e o gerenciamento de resíduos orgânicos, tanto para o ambiente acadêmico quanto para a comunidade circundante (Ferreira, 2024). O equipamento mostrado Figura 1, configura-se como um sistema compacto e eficaz para a produção integrada de biogás e biofertilizante, atendendo a requisitos técnico-econômicos adequados para pequenas unidades produtivas e bancadas de teste. A pesquisa fundamentou-se no

monitoramento da estrutura inicial do reator para acompanhar a produção de biogás e analisar variáveis operacionais críticas, incluindo a concentração de gases (CH_4 , CO_2 , H_2S e NH_3) e o controle do pH. O projeto original de Ferreira (2024), o biodigestor opera no modelo de Semi-contínuo, modalidade que permite a alimentação periódica com novo substrato orgânico e a remoção gradual do digestato, eliminando a necessidade de interrupções no ciclo de processamento. Este modelo é notavelmente eficiente para a produção ininterrupta de biogás, pois facilita a manutenção de um ambiente microbiológico estável dentro da câmara de digestão.

2.2. PREPARAÇÃO E ALIMENTAÇÃO INICIAL DO BIODIGESTOR

Para alimentação inicial do biodigestor foi utilizada uma mistura selecionada de restos de alimentos, esterco e água, como mostra a Figura 1, visando criar condições adequadas para a digestão anaeróbica e iniciar a geração de biogás. A seleção do substrato foi feita com base em uma combinação de elementos que oferecem diferentes fontes de carbono, nitrogênio e outros nutrientes essenciais para os microrganismos envolvidos em cada fase do processo anaeróbico.

Figura 1: Biodigestor Caseiro e sua alimentação



Fonte: A autoria Própria

O volume total do biodigestor é de 30L, porém só foram utilizados 18L de sua capacidade, para haver disponibilidade de circulação dos gases. Na alimentação do reator, foi utilizado 0,8kg de esterco bovino e 1,7kg de restos de alimentos que incluem couve, cascas de beterraba, cascas de cenoura, cuscuz de milho, arroz e feijão. Além dos substratos mencionados, foram adicionados 300 ml de inóculo de um biodigestor em funcionamento no Instituto Federal da Paraíba (IFPB) localizado em Sousa, com o objetivo de introduzir microrganismos que já estão adaptados e atuantes no processo de digestão anaeróbica, Com

intuito de inserir uma microbiota variada e equilibrada, assegurando que os microrganismos vitais para cada etapa do processo de biodigestão.

2.3. ADAPTAÇÕES ESTRUTURAIS DO BIODIGESTOR

O biodigestor passou por diversas adaptações estruturais para garantir a eficiência do sistema, minimizar vazamentos e otimizar a produção de biogás. Essas modificações foram realizadas conforme necessidades identificadas durante a operação do biodigestor e visaram aprimorar a vedação, controle da pressão interna e armazenamento do biogás.

Após a instalação inicial do biodigestor, o sistema demonstrou falhas estruturais críticas que comprometeram a estanqueidade e segurança operacional. O primeiro desafio evidente foi um vazamento de biogás na parte superior do equipamento, demandando ajustes imediatos. A solução inicial concentrou-se na vedação das conexões, utilizando silicone PU e reforço com cola soldável para PVC, além do fortalecimento da tampa para conter o escape de gás. Essas medidas foram implementadas para garantir a retenção de gás e iniciar o processo de digestão anaeróbica.

A primeira fase operacional, contudo, revelou a necessidade de uma segunda adaptação mais robusta, essencial para corrigir as falhas que afetavam a segurança e a eficiência do sistema. Esta modificação envolveu a substituição da vedação por fita autossoldante de alta fusão, um material que conferiu maior durabilidade e eficácia para operar sob pressão. Além disso, a combinação do calor fermentativo interno com o aquecimento externo (exposição solar) causou o afrouxamento de algumas conexões em PVC. Para mitigar essa vulnerabilidade térmica e estrutural, uma nova camada de silicone PU foi aplicada em todas as junções, estabelecendo uma barreira elástica e resistente às variações de temperatura e pressão. Essas adaptações foram decisivas para elevar a segurança operacional, minimizar perdas de gás e assegurar a retenção eficiente do biogás produzido, conferindo maior estabilidade e continuidade ao processo de biodigestão anaeróbica.

Para garantir a integridade estrutural e a estanqueidade do sistema sob pressão, foram executadas intervenções críticas de vedação e a instalação de um gasômetro. A montagem do gasômetro exigiu o reforço de todas as uniões do PVC com Cola de Solda, crucial para assegurar a aderência e a durabilidade do sistema. Adicionalmente, foi aplicada uma camada suplementar de PU nas principais conexões, um vedante reconhecido por sua resistência à pressão e aos gases inerentes ao processo anaeróbico (CIBIOGÁS, 2020). Após a instalação dos

reforços, o gasômetro foi interligado ao biodigestor (Figura 2) e a válvula liberada para o direcionamento do biogás. Esta estrutura de armazenamento é vital, pois minimiza o risco de explosões ao aliviar a pressão interna do reator e, simultaneamente, permite o aproveitamento futuro e eficaz do biogás produzido, evitando o desperdício que ocorreria em sistemas sem capacidade de armazenamento (DEGANUTTI et al., 2002).

Figura 2: Biodigestor depois das modificações



Fonte: Autoria Própria

2.4. NOVA ALIMENTAÇÃO

Após a finalização das modificações estruturais no biodigestor, foi instituída uma nova fase de alimentação para restabelecer a comunidade microbiana e otimizar a cinética do processo anaeróbico. O substrato reformulado integrou de 4,8 kg de esterco bovino e 4,5 litros de água, complementado pela adição de 5 litros de inóculo. Esta estratégia foi crucial, pois o inóculo, Cordialmente cedido pelo Departamento de Agroecologia do IFPB - Campus Sousa, introduziu uma população microbiana já adaptada, incluindo arqueas metanogênicas e bactérias hidrolíticas e fermentativas (SILVEIRA, 2017). A reinoculação com esse material funcional demonstrou-se fundamental para acelerar a fase inicial de adaptação e decomposição, promovendo uma produção de biogás mais estável e consistente.

2.5. AQUISIÇÃO DE DADOS

A obtenção de dados sobre o biogás gerado pelo biodigestor do laboratório de Biotecnologia da Unidade Acadêmica Sousa da UEPB. As análises foram suficientes para fornecer uma visão representativa da qualidade do biogás, da eficiência do biodigestor e dos fatores críticos que influenciam o processo de digestão anaeróbica, como o pH do substrato, a composição do biogás (CH_4 , CO_2 , H_2S e NH_3), a pressão interna e o comportamento da produção de gás ao longo do tempo.

- Para a determinação de pH Utilizou se o Medidor de pH mPA210 (MS TecnoPON Instrumentação).
- Composição do biogás, foi utilizado o Kit de Análise de Biogás Portátil Alfakit/Embrapa, medindo concentração de CH₄, CO₂, NH₃ e H₂S.

Para fazer o teste de chama, foi utilizado um fogareiro modificado, A alteração envolveu a adaptação da válvula do fogareiro, realizada com uma broca de aço de 2 mm, para ajustar a passagem do gás às propriedades do biogás produzido. Essa modificação assegurou um fluxo contínuo e controlado, fundamental para analisar a qualidade da queima.

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1. PRIMEIRA ALIMENTAÇÃO E INSTABILIDADE DO SISTEMA

A primeira alimentação composta por 18 litros de água, 0,8 kg de esterco bovino, 1,7 kg de restos de alimentos e 300 ml de inóculo (proveniente do IFPB), conforme abordado anteriormente. Embora a primeira geração de gás tenha sido registrada, o sistema demonstrou instabilidade, incluindo vazamento de gás pela parte superior devido à pressão interna. A análise do Potencial Hidrogeniônico pH inicial atingiu 4,8, indicando uma acidificação severa do meio, o que é prejudicial à metanogênese, cuja faixa ideal é de 6,5 a 7,5 (CIBIOGÁS, 2020). Essa instabilidade culminou em um incidente estrutural, onde o acúmulo excessivo de pressão, combinado com uma vedação inadequada (fita veda-rosca), levou à “explosão” do biodigestor (conforme ilustra a Figura 3), onde a pressão interna aumentou devido a produção de biogás, e as conexões não suportaram e líquido foi expelido; enfatizando a urgência de aprimoramentos estruturais para garantir a segurança e a continuidade do processo.

Figura 3: Incidente no biodigestor



Fonte: Autoria Própria

3.2. ADAPTAÇÕES NO SISTEMA E SEGUNDA ALIMENTAÇÃO

Em resposta às falhas estruturais, a segunda intervenção técnica focou em aprimorar drasticamente a segurança operacional e a vedação. O ajuste principal foi a substituição da vedação fragilizada por um cano de PVC rosqueável com tampão, garantindo um controle de pressão superior e selagem mais segura. Todas as conexões foram adicionalmente reforçadas com cola soldável para PVC e silicone PU, elevando a resistência contra variações térmicas e perdas de gás. Em seguida, foi realizada a segunda alimentação, composta por 5 litros de inóculo (cordialmente cedido no IFPB), 4,5 litros de água e 4,8 kg de esterco bovino. Este novo experimento reintroduziu uma comunidade microbiana ativa e elevou o pH do substrato para 7,1, valor ideal para a eficiência da digestão anaeróbica. Finalmente, a conexão a um gasômetro agiu como reservatório e regulador de pressão, assegurando o armazenamento seguro do biogás e evitando novos incidentes, o que resultou em maior estabilidade e melhor qualidade de produção.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS

A Tabela 2 apresenta detalhadamente a composição do biogás produzido nos diferentes momentos do experimento, evidenciando a relação entre os componentes principais e as condições operacionais. A geração de biogás foi avaliada em cinco intervalos distintos, com foco nas proporções de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Os níveis de CH_4 oscilaram entre 57,5% e 87,5%, atingindo seu pico em 14/11/2024. Essa variação indica a eficiência da metanogênese em períodos de maior equilíbrio químico do substrato. Em contrapartida, o CO_2 apresentou um comportamento inversamente proporcional, variando de

12,5% a 42,5%, com valores mais elevados associados a instabilidades do sistema, como observado em 25/11/2024. Segundo Xavier e Lucas (2010), concentrações de metano superiores a 60% são consideradas adequadas para garantir uma combustão eficiente.

Tabela 2: Caracterização do Biogás

Data	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	NH ₃ (ppm)	pH
08/11/2024	82,5	17,5	20	175	7,1
11/11/2024	72,5	27,5	20	175	6,6
14/11/2024	87,5	12,5	20	175	6,15
24/11/2024	57,5	42,5	20	175	6,95
27/11/2024	65	35	20	175	7,15

Fonte: Autoria Própria

Apesar da instabilidade inicial, as ações corretivas implementadas no sistema demonstraram sucesso na restauração da produção de biogás e no aprimoramento de sua qualidade. O monitoramento do Potencial Hidrogeniônico pH foi um parâmetro essencial para o sucesso, dada a sua influência direta na atividade microbiana em todas as fases da DA. Na primeira fase de alimentação, o pH inicial foi de 4,32, um valor extremamente ácido que inibiu a atividade metanogênica, indicando acúmulo de Ácidos Graxos Voláteis. Contrastando com essa condição, após os ajustes estruturais e a reinoculação, o pH registrado na segunda alimentação (06/11/2024) foi de 7,1, valor ideal para a atuação das arqueas metanogênicas e para a eficiência do processo (Silveira, 2017).

A manutenção desse ambiente estável favoreceu a produção de metano, evidenciada em 08/11/2024. As concentrações de poluentes gasosos se mantiveram em níveis seguros: 20 ppm de Sulfeto de Hidrogênio e 175 ppm de Amônia (Deganutti et al., 2002). As intervenções mais significativas para essa estabilidade incluíram a adição estratégica de inóculo recém-coletado e esterco bovino (06/11/2024), que restaurou a microbiota; a instalação do Gasômetro, que regulou a pressão interna e possibilitou o armazenamento seguro do biogás; e o fortalecimento das conexões com adesivo soldável de PVC e silicone PU, o que eliminou vazamentos. Tais medidas provaram que alterações técnicas básicas são altamente eficazes para aumentar o desempenho em sistemas de pequena escala.

Os resultados finais atestam a viabilidade do biodigestor como uma opção sustentável para a geração de energia renovável. A presença de uma chama azul clara durante o teste de combustão confirmou a alta qualidade do biogás gerado e o sucesso das ações

implementadas. Contudo, as variações observadas nos níveis de CH_4 e pH destacam a necessidade de monitoramento contínuo e manutenção preventiva. Para otimizações futuras, alinhadas com as sugestões de Xavier e Lucas (2010), é urgente a implementação de sensores em tempo real para vigilância do pH e da pressão, bem como a regulação da temperatura, visando um funcionamento ainda mais consistente e eficaz.

3.4. TESTE DE CHAMA

Este teste foi executado um teste de chama com o intuito de avaliar a qualidade do biogás gerado conforme ilustra Figura 4. O gás que estava no gasômetro foi encaminhado para o fogareiro modificado, depois do ajuste e da ligação do fogareiro ao gasômetro, a chama resultante foi analisada e revelou uma coloração azul clara, o que sugere a predominância de metano (CH_4) no biogás e a baixa presença de impurezas, como dióxido de carbono (CO_2) em grandes quantidades ou sulfeto de hidrogênio (H_2S). De acordo com Xavier e Lucas (2010), a chama azul é um sinal de que o biogás possui alta eficiência energética, confirmando uma concentração de CH_4 acima de 60%.

Figura 4: Teste de chama do Biogás



Fonte: Autoria Própria

3.5. PROBLEMAS POTENCIAIS

As restrições operacionais do biodigestor foram multifatoriais, destacando-se a influência das condições ambientais e a fragilidade estrutural inerente ao protótipo de baixo custo. A ausência de controle térmico expôs o sistema às variações de temperatura características da região da cidade de Sousa - PB, afetando diretamente a atividade microbiana e a consistência da metanogênese. Outra limitação residiu na inconsistência da matéria-prima: a diversidade dos resíduos alimentares, embora a combinação com esterco bovino fosse apropriada, introduziu o risco de elevação dos níveis de amônia (oriunda de proteínas) ou o acúmulo de ácidos graxos de cadeia longa (oriundos de gorduras), ambos inibidores da metanogênese. Concomitantemente, a escolha por materiais acessíveis

comprometeu a robustez do sistema, manifestada em falhas estruturais como vazamentos e a explosão inicial, que exigiram manutenções corretivas e interromperam temporariamente a coleta de dados. Essas restrições ressaltam a importância de considerar as particularidades dos sistemas de menor escala e a urgência de aprimoramentos estruturais e funcionais para garantir a estabilidade em projetos futuros.

3.6. SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Apesar de os resultados serem encorajadores, é importante ressaltar que sistemas pequenos, como o biodigestor em análise, apresenta alta sensibilidade ao clima e condições ambientais. A adoção de sensores para monitoramento constante, juntamente com controles térmicos, poderia melhorar a eficiência do processo e diminuir a necessidade de intervenções corretivas. Finalmente, pesquisas futuras podem investigar a otimização de substratos e o aumento da escala do sistema para aplicações em maior escala, sempre com ênfase na sustentabilidade e na acessibilidade. De acordo com os resultados alcançados, são sugeridas as seguintes orientações para futuras implementações:

- Acompanhamento Constante: A implementação de sensores para a supervisão em tempo real de fatores como pH, pressão e composição do biogás pode aumentar consideravelmente a eficácia e a segurança do sistema.
- Melhoria do Substrato: A mistura de diferentes substratos, como dejetos de gado e restos de comida, provou ser eficaz, mas modificações complementares podem aprimorar ainda mais a composição química do sistema.
- Capacidade de expansão: A unidade de 30 litros mostrou restrições por conta de seu tamanho compacto. Reproduzir em unidades de maior volume poderia otimizar o desempenho do biodigestor, preservando os fundamentos operacionais destacados nesta pesquisa.
- Gerenciamento Térmico: A adoção de estratégias para regular a temperatura interna do biodigestor pode minimizar as variações microbianas e químicas, particularmente em locais que enfrentam condições climáticas severas.

4. CONCLUSÕES

A pesquisa realizada com o biodigestor artesanal de 30 litros, localizado na Unidade Acadêmica de Sousa da UEPB, demonstrou a viabilidade técnica do uso dessa tecnologia em

pequena escala como alternativa sustentável para a produção de biogás e biofertilizante. O sistema mostrou-se funcional, mesmo diante de limitações estruturais e operacionais, e comprovou a importância de medidas como o controle do pH, a qualidade do substrato e a manutenção das condições anaeróbicas.

Foram obtidos valores de metano entre 57,5% e 87,5%, com estabilidade significativa após a segunda alimentação, que incluiu inóculo e reforço na vedação. O teste de chama realizado ao final do experimento confirmou o potencial energético do biogás produzido.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. E. D. **Importância do pH no Equilíbrio Químico de Biodigestores Anaeróbios**. Universidade Federal do Ceará, 2020.
- ANAEROBIC DIGESTION: **BIOGAS PRODUCTION AND ODOR REDUCTION**. Extension, Penn State University, 2023.
- BARDIN, Laurence. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.
- FERREIRA, Francisco Carlos Alexandre. Estudo de Caso: **Funcionamento e Desempenho de Biodigestores Caseiros**. Campus IV da UEPB. 2024.
- CIBIOGÁS **Manual de Produção de Biogás e Biofertilizante: Técnicas e Práticas Sustentáveis**. CIBIOGÁS, 2020.
- CUNHA, R. S., & LIMA, A. B. (2021). **Educação Ambiental e Biodigestores: Capacitação para o Desenvolvimento Sustentável**. Revista Brasileira de Educação Ambiental, 16(1), 110-122.
- DEGANUTTI, R.; PLÁCIDO PALHACI, MCJ; ROSSI, M.; TAVARES, R.; DOS SANTOS, C. **Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada**. Departamento de Artes e Representação Gráfica, FAAC - Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, UNESP - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2002.
- DIACONIA. **Manual de Construção do Biodigestor Sertanejo**. 2020.
- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- KOCH, K.; HELMREICH, B.; DREWES, J. E. **Influence of Seasonal Temperature Variations on Biogas Production Efficiency in Anaerobic Digesters**. Environmental Science & Technology, 2015.
- MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- MARCHI, G.; BARBOSA, C. E.; BRESSANI, R. **Técnicas de Operação de Biodigestores e Inóculos em Sistemas Rurais**. Revista Brasileira de Biogás, v.8, n.1, 2014.

- Santos, E. M., et al. (2019). **Compostagem e Biodigestores: Estratégias para a Sustentabilidade em Comunidades Rurais**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, 23, e01404.
- Santos, R. G., Rocha, J. D., & Ribeiro, T. H. (2020). **Viabilidade técnica e econômica de biodigestores na geração de biogás em pequenas propriedades rurais**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.
- Silva, A. B., & Santos, C. D. (2020). **Biodigestores como Alternativa para Redução de Custos Energéticos em Comunidades de Baixa Renda**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, 9(1), 1-15.
- SILVEIRA, A. M. **Avaliação dos Parâmetros de Controle para Biodigestores com Dejetos Bovinos**. Universidade Federal de Viçosa, 2017.
- UDDIN, Md Mosleh; WRIGHT, Mark Mba. **Anaerobic Digestion Fundamentals, Challenges, and Technological Advances**. De Gruyter, 2022.
- XAVIER, C. A. N.; LUCAS, J. de. **Parâmetros de Dimensionamento para Biodigestores Batelada Operados com Dejetos de Vacas Leiteiras com e sem Uso de Inóculo**. Engenharia Agrícola, v.30, n.2, p. 239-247, 2010.

CAPÍTULO III

GESTÃO INTELIGENTE DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS

INTELLIGENT INDUSTRIAL WASTE MANAGEMENT

DOI: 10.51859/ampla.mas5450-3

Jair Henrique dos Passos Velozo¹

Emmanuel Romero Martins da Silva²

Jaqueline dos Santos Marinho³

Bruna Glória Alves Dantas⁴

Armando Jose Gomes Filho⁵

Eliana Cristina Barreto Monteiro⁶

Ângelo Just da Costa e Silva⁷

¹ Mestrando em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

² Mestrando em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

³ Doutoranda em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

⁴ Mestranda em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

⁵ Doutorando em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

⁶ Profª adjunta Pós-graduação. Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP e Universidade de Pernambuco - UPE

⁷ Profª adjunto Pós-graduação. Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP e Universidade de Pernambuco - UPE

RESUMO

A gestão de resíduos sólidos urbanos e industriais enfrenta desafios crescentes devido ao aumento projetado de 70% na geração de resíduos até 2050. Este estudo analisa a integração de tecnologias da Indústria 4.0 - Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Big Data e Blockchain - como soluções inovadoras para otimização de processos de gestão de resíduos. A pesquisa, baseada em revisão bibliográfica, investigou sistemas inteligentes implementados em centros urbanos e instituições de saúde, avaliando benefícios operacionais, ambientais e econômicos. Os resultados demonstram que lixeiras inteligentes equipadas com sensores IoT possibilitam monitoramento em tempo real, com precisões superiores a 96% na previsão de enchimento. Algoritmos de IA para otimização de rotas resultaram em redução de até 30% nos custos logísticos. A aplicação de redes neurais convolucionais na classificação automatizada alcançou 93% de acurácia. Casos de sucesso em hemocentros evidenciaram melhorias na segregação de resíduos infectantes, atingindo 95% de classificação correta e redução de custos superior a US\$ 3.181,16. A tecnologia Blockchain garantiu rastreabilidade segura. Conclui-se que a integração tecnológica promove eficiência operacional e contribui para estratégias de economia circular e práticas ESG, embora barreiras

técnicas, regulatórias e econômicas ainda precisem ser superadas para implementação em larga escala.

Palavras-chave: Gestão de Resíduos inteligente. Internet das coisas (IoT). Inteligência Artificial (IA). Cidade inteligente. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Urban and industrial solid waste management faces growing challenges due to the projected 70% increase in waste generation by 2050. This study analyzes the integration of Industry 4.0 technologies - Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), Big Data, and Blockchain - as innovative solutions for optimizing waste management processes. The research, based on literature review, investigated intelligent systems implemented in urban centers and healthcare institutions, evaluating operational, environmental, and economic benefits. Results demonstrate that smart bins equipped with IoT sensors enable real-time monitoring, with accuracy rates exceeding 96% in fill-level prediction. AI algorithms for collection route optimization resulted in up to 30% reduction in logistics costs and significant decrease in pollutant emissions. Application of convolutional neural networks in automated waste classification achieved 93% accuracy, surpassing traditional methods. Success cases in blood centers showed

improvements in infectious waste segregation, reaching 95% correct classification and operational cost reduction exceeding US\$ 3.181,16. Blockchain technology ensured secure traceability from collection to final disposal. It is concluded that technological integration promotes operational efficiency and contributes to circular economy

strategies and ESG practices, although technical, regulatory, and economic barriers still need to be overcome for large-scale implementation.

Keywords: Smart Waste Management. Internet of Things (IoT). Artificial Intelligence (AI). Smart City. Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos urbanos e industriais constitui um desafio ambiental crescente, especialmente diante da projeção de aumento de 70% na geração de resíduos até 2050. Nesse contexto, as tecnologias da Indústria 4.0 - IoT, Inteligência Artificial, Big Data e Blockchain - emergem como soluções transformadoras capazes de otimizar processos de coleta, segregação e destinação final.

Este estudo investiga a aplicação dessas tecnologias na gestão inteligente de resíduos, analisando casos de sucesso e avaliando os benefícios operacionais, ambientais e econômicos de sistemas automatizados. Através de revisão bibliográfica, busca-se compreender como a integração tecnológica pode estabelecer novos padrões de eficiência e sustentabilidade, contribuindo para estratégias de economia circular e práticas ESG.

2. OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivos analisar a integração de tecnologias da Indústria 4.0 (*IoT*, *IA*, *Big Data* e *Blockchain*) na gestão de resíduos sólidos urbanos e industriais, avaliar os benefícios de sistemas inteligentes na otimização de processos de segregação, coleta e destinação final de resíduos, investigar estudos de caso e práticas em instituições de saúde e centros urbanos, identificando estratégias de sucesso em ESG e economia circular, comparar diferentes modelos e arquiteturas tecnológicas propostas na literatura, com foco em desempenho, custos operacionais e sustentabilidade ambiental, e propor recomendações para superar barreiras técnicas, regulatórias e econômicas na implementação de soluções inteligentes para gestão de resíduos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. FUNDAMENTOS E CONTEXTUALIZAÇÃO

3.1.1. Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e Sistemas Integrados de Gestão de Resíduos

A gestão eficiente de resíduos industriais consolidou-se como um imperativo estratégico para empresas em todo o mundo. Este artigo discute as inovações e práticas que estão transformando a maneira como as indústrias lidam com seus subprodutos, convertendo o que antes era considerado “lixo” em recursos de alto valor.

Segundo Silva *et al.* (2023), a gestão de resíduos industriais constitui um tema central para a preservação ambiental e para a saúde pública, sendo essencial à mitigação dos impactos negativos sobre o meio ambiente e a qualidade de vida das populações.

A pesquisa de Costa e Lima (2021) evidencia que sistemas de gestão bem estruturados têm o potencial de otimizar processos, reduzir custos e abrir novas oportunidades de negócio por meio da economia circular. A gestão inteligente de resíduos industriais representa uma mudança de paradigma. Mais do que atender à legislação, ela promove uma cultura de inovação, sustentabilidade e responsabilidade social.

3.2. INTERNET DAS COISAS (IOT)

Anusuya Devi *et al.* (2025) propõe uma arquitetura inovadora que integra *IoT*, *IA* e *Blockchain* para criar um ecossistema de gestão de resíduos baseado em dados. O sistema utiliza por exemplo, lixeiras inteligentes equipadas com sensores *IoT* que monitoram níveis de resíduos, temperatura e umidade em tempo real, transmitindo dados para plataformas de gestão através de protocolos de comunicação de baixo custo como *LoRaWAN* e *NB-IoT*.

Já Erman Irfan *et al.* (2025) desenvolveu o Sistema de Gerenciamento de Resíduos Inteligente baseado em *IoT* (SWIMS - *Smart Wireless Multimodal Sensory Systems*), especificamente nos desafios da gestão de resíduos no Paquistão. O sistema implementa uma arquitetura de *IoT* com cinco camadas integradas a um modelo de negócios de economia circular. Utilizando lixeiras inteligentes com sensores acionados por *IoT* e autenticação de Identificação por Radiofrequência (RFID) para estimular o descarte adequado de resíduos. O sistema inclui sensores de peso, sensores para categorização de materiais (plástico, papel, metal, vidro), sensores ultrassônicos para detectar níveis de enchimento, e um microcontrolador arduino *Mega 2560* WiFi com ESP8266 para processamento de dados.

Um diferencial significativo é a implementação da tecnologia *Blockchain* para rastreamento seguro e transparente dos resíduos desde a coleta até o descarte final, garantindo responsabilização e prevenindo descarte ilegal. Os contratos inteligentes automatizam pagamentos e conformidade com normas ambientais, criando um sistema de gestão completamente transparente (Devi *et al.*, 2025; Housseem Jerbi *et al.* (2025)).

Utilizando módulo de detecção com sensores de chama, ultrassônicos, peso, temperatura e umidade, conectados a microcontroladores arduino com interfaces de rede GSM GPRS e sistemas de alimentação solar, traz uma nova realidade aos sistemas de controles de resíduos (Housseem Jerbi *et al.* (2025)). O módulo de armazenamento emprega algoritmos de distribuição estatística para posicionamento otimizado de lixeiras e técnicas otimizadas para previsão do comportamento dessas lixeiras sem a interferência humana.

Os resultados demonstram precisões entre 94,65% e 96,42% nas iterações, com tempos de processamento significativamente menores em comparação com métodos tradicionais de *Machine Learning*, *Deep Learning* e CNN, confirma os experimentos de (Housseem Jerbi *et al.*, 2025). O sistema contribui para redução significativa do consumo de combustível e custos operacionais através da otimização de rotas de coleta.

Luís Pires *et al.* (2025) desenvolveu uma solução inovadora utilizando tecnologia *Time-of-Flight (ToF)* para monitoramento em tempo real de níveis de lixo urbano. O sistema emprega sensores, que utiliza modulação de Onda Contínua para precisão de distância, contabilizando alta precisão em até 64 zonas simultâneas. A arquitetura do sistema inclui um microcontrolador para conectividade *IoT*, um *Raspberry Pi 3* como *gateway*, e a plataforma *Sensefinity* para processamento e visualização de dados em nuvem. O *ToF-Node* se comunica via *Wi-Fi* com o *gateway*, que posteriormente transmite os dados para a nuvem *IoT*.

Os testes experimentais incluíram cenários de medição de altura, adição de blocos, diferentes dimensões de objetos e ambientes confinados, demonstrando a eficácia da tecnologia *ToF* no monitoramento ambiental, por exemplo. Como se não bastasse, Sreerama Murty Maturi *et al.* (2025) propõe um modelo de lixeiras inteligentes focado na otimização de recursos e redução de custos operacionais, utilizando um sistema com uma configuração mecânica automatizada para segregar resíduos secos e úmidos, com monitoramento em tempo real através de sensores *IoT*. Os componentes principais incluem uma placa Arduino (*ATmega 328*), módulo GSM SIM900A para comunicação móvel, módulo GPS NEO-6M para localização, sensor ultrassônico HC-SR04 para detecção de níveis, *display LCD 16x2* e

indicadores *LED* para *status* visual. Isso na prática significa dizer que, quando uma lixeira atinge capacidade máxima, o sistema envia mensagens SMS via GSM às autoridades competentes, incluindo localização via *Google Maps*. Demonstrando potencial significativo para redução de viagens de coleta, diminuição de custos de combustível e mão de obra, além de contribuir para cidades mais limpas e sustentáveis. A implementação facilita a promoção de programas de reciclagem direcionados e fornece dados importantes para planejamento urbano.

3.3. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA)

3.3.1. IA e cidades inteligentes

Para a IBM (2024), IA é uma tecnologia que permite que computadores e máquinas simulem o aprendizado, a compreensão, a resolução de problemas, a tomada de decisões, a criatividade e a autonomia dos seres humanos.

Estamos vivenciando uma nova revolução industrial. Essa revolução tem sido impulsionada pelo desenvolvimento de tecnologias avançadas como a Inteligência Artificial. As máquinas não estão somente fazendo trabalhos manuais, mas também trabalhos racionais, tarefas que requerem o uso do que se considera inteligência (Ludermir, 2021).

Contudo, os recentes avanços obtidos nos domínios da IA revelam perspectivas e oportunidades transformadoras para melhorar e otimizar o desempenho ambiental e a eficiência das cidades inteligentes. Estes avanços podem trazer melhorias contínuas e impulsionar soluções para as cidades enfrentarem os desafios ambientais complexos, dentre eles, a Gestão de Resíduos Urbanos (GRU) Figura 1, (Maranhão, 2024).

Figura 1 – Processo de cidade inteligente.



Fonte: Blog eureciclo, 2025.

Segundo Maranhão (2024), acredita-se que por intermédio da utilização de tecnologias avançadas e IA, as cidades inteligentes possam aumentar a sua competitividade econômica e criar padrões de vida mais elevados para os seus cidadãos.

Uma gestão de resíduos com classificação eficiente desempenha um papel importante no desenvolvimento ecologicamente sustentável, garantindo que os resíduos sejam descartados adequadamente. A coleta seletiva eficiente é frequentemente implementada para melhorar a reciclagem e reduzir o impacto ambiental. Ao longo dos anos, muitos projetos foram implementados com o objetivo de minimizar o impacto do descarte descontrolado de resíduos. Tecnologias como RFID e Rede de Sensores (RS) têm sido utilizadas para fornecer uma nova maneira de otimizar os sistemas de gerenciamento de resíduos (Costa, Bernades, Pereira *et al.*, 2018).

3.3.2. Algoritmos de otimização e análise preditiva

A gestão ineficiente de resíduos sólidos urbanos representa uma crise global, com previsão de aumento de 70% na geração de lixo até 2050 e cerca de 33% dos resíduos atuais sem tratamento adequado. Na Colômbia, apenas 16,5% das 12 milhões de toneladas anuais são recicladas, em grande parte devido à falta de conhecimento da população, levando ao esgotamento dos aterros e à proliferação de lixões. Em Cúcuta, o acúmulo diário de lixo já configura estado de emergência, reforçando a necessidade de soluções tecnológicas. Nesse cenário, propõe-se um algoritmo de *Deep Learning* para identificar e classificar resíduos, a fim de mitigar o colapso dos sistemas de destinação e ampliar as taxas de reciclagem (Ortiz, Castro, Nino *et al.*, 2022).

Costa, Bernades, Pereira *et al.* (2018) propôs o uso de uma abordagem de visão computacional, baseada em técnicas de redes neurais (NN), como uma alternativa eficiente para classificar o lixo nas categorias de reciclagem. O sistema concebido visa auxiliar o usuário a determinar a lixeira correta para o descarte, utilizando uma imagem do material obtida por câmera digital, o que resulta em menor necessidade de contato humano. O projeto utilizou um banco de dados de imagens de lixo que continha aproximadamente 400 imagens para cada classe, abrangendo quatro categorias distintas: vidro, papel, metal e plástico.

Foram comparados modelos de *Deep Learning* e algoritmos tradicionais de *Machine Learning* na tarefa de classificação, incluindo VGG-16, AlexNet, SVM, KNN e Random Forest. Os resultados mostraram que as Redes Neurais Convolucionais (CNN) superaram os métodos

tradicionais, com destaque para a *VGG-16*, que obteve 93% de acurácia, seguida da *AlexNet* (91%), *KNN* (88%), *RF* (85%) e *SVM* (80%). A análise estatística (*ANOVA* e teste *Tukey HSD*) confirmou que a superioridade da *VGG-16* é estatisticamente significativa ($p = 0,0012$), consolidando-a como a melhor alternativa para a classificação automatizada (Costa, Bernades, Pereira *et al.*, 2018).

3.3.3. Robôs e automação na separação de recicláveis

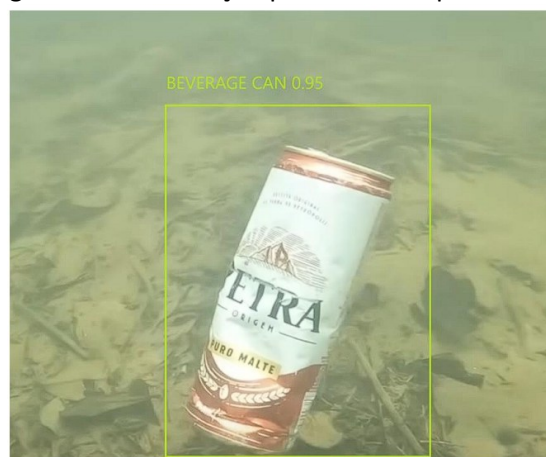
Para Faveri e Viera (2025), a IA é a tecnologia central aplicada para otimizar os processos de coleta, visando maior eficiência operacional, redução de custos e melhor sustentabilidade ambiental. Sistemas de Coleta Inteligente são pautados no uso de sensores, sistemas de roteirização otimizados por IA e plataformas que permitem o monitoramento em tempo real. Esses sistemas estão alinhados com o conceito de cidades inteligentes. A IA é aplicada em tecnologias embarcadas, como sensores de volume, algoritmos de roteirização otimizada e automação de veículos. A IA pode aprimorar o planejamento das rotas, minimizar a necessidade de intervenções manuais e aumentar a eficiência na triagem e destinação adequada dos resíduos.

Uma das principais aplicações tecnológicas da IA é na logística de coleta, algoritmos de roteirização otimizada, estes algoritmos permitem o planejamento dinâmico das rotas dos caminhões de coleta. A IA analisa os dados em tempo real (fornecidos pelos sensores) e ajusta as rotas para garantir que apenas os contêineres cheios sejam coletados (Faveri e Viera, 2025).

De acordo com Valente, Coelho e Assis (2024), a aplicação da Inteligência Artificial com técnicas de visão computacional possibilita a identificação de resíduos em tempo real, embora a detecção em ambientes aquáticos apresente desafios, como baixa luminosidade, turvação e distorções cromáticas. Para superar essas limitações, este estudo propõe uma arquitetura híbrida baseada na *ResNet-50* com módulos de atenção espectral, capazes de ajustar dinamicamente as bandas afetadas pelo meio. O treinamento foi reforçado com técnicas de aumento de dados (*MixUp*, *CutMix*, *Mosaic*) e imagens sintéticas geradas por *GANs*, aumentando a robustez e a generalização do modelo. Nos experimentos, a proposta superou arquiteturas convencionais, como o *YOLOv5*, em todas as métricas, incluindo a *mAP*.

A Figura 2 mostra a identificação por meio de visão computacional debaixo da água.

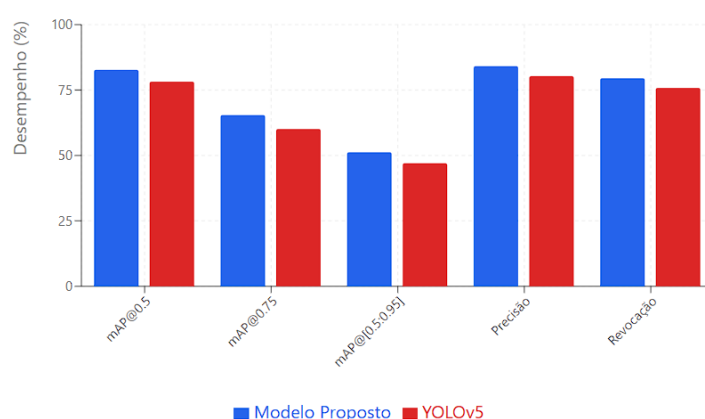
Figura 2 – Classificação por visão computacional.



Fonte: Valente, Coelho e Assis, 2024.

Ainda segundo Valente, Coelho e Assis (2024), o modelo proposto superou o *YOLOv5* em todas as métricas avaliadas. O ganho mais expressivo foi observado na $mAP@[0.5:0.95]$, que considera múltiplos limiares de *IoU*, indicando uma melhora significativa na precisão das *bounding boxes* preditas, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Classificação por visão computacional.



Fonte: Blog eureciclo, 2025.

3.4. SISTEMAS DE MONITORAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Os estudos evidenciam a importância da seleção adequada de protocolos de comunicação para diferentes cenários de aplicação. Principalmente no que discerne monitoramento e análise de dados, *LoRaWAN* e *NB-IoT* são preferidos para aplicações de longo alcance e baixo consumo de energia, enquanto *Wi-Fi* e *GSM* são usados para comunicação de dados em tempo real (Anusuya Devi *et al.*, 2025; Erman Irfan *et al.*, 2025; Houssein Jerbi *et al.*, 2025; Maturi *et al.*, 2025). Esta diversificação permite adaptação a diferentes contextos urbanos e requisitos operacionais. Os sistemas propostos demonstram

melhorias significativas na eficiência operacional. A otimização de rotas de coleta resulta em redução substancial do consumo de combustível e custos operacionais, com alguns estudos relacionados a precisões de previsão superiores a 96% (Jerbi *et al.*, 2025). A coleta baseada na demanda real, ao invés de cronogramas fixos, representa uma mudança fantástica na gestão de resíduos urbanos. A escalabilidade em sistemas para cidades de grande porte e a interoperabilidade entre diferentes plataformas tecnológicas emergem como questões críticas para adoção ampla (Anusuya Devi *et al.*, 2025; Maturi *et al.*, 2025).

Estudos sugerem que futuras implementações deverão focar na integração harmoniosa, com a infraestrutura urbana existente, minimizando custos de implantação e maximizando o aproveitamento de recursos disponíveis. A colaboração com autoridades municipais surge como fator crítico de sucesso (Erman Irfan *et al.*, 2025; Housseem Jerbi *et al.*, 2025).

A necessidade de desenvolvimento de padrões técnicos e regulamentações específicas para sistemas de gestão inteligente de resíduos é evidenciada pelos trabalhos desenvolvidos. Os resultados sugerem potencial significativo para o desenvolvimento de algoritmos adaptativos que se ajustem automaticamente aos padrões locais de geração de resíduos, condições climáticas e características demográficas específicas (Jerbi *et al.*, 2025; Pires *et al.*, 2025)

3.5. SISTEMAS DE MONITORAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

3.5.1. Indicadores de Desempenho como Ferramenta de Monitoramento

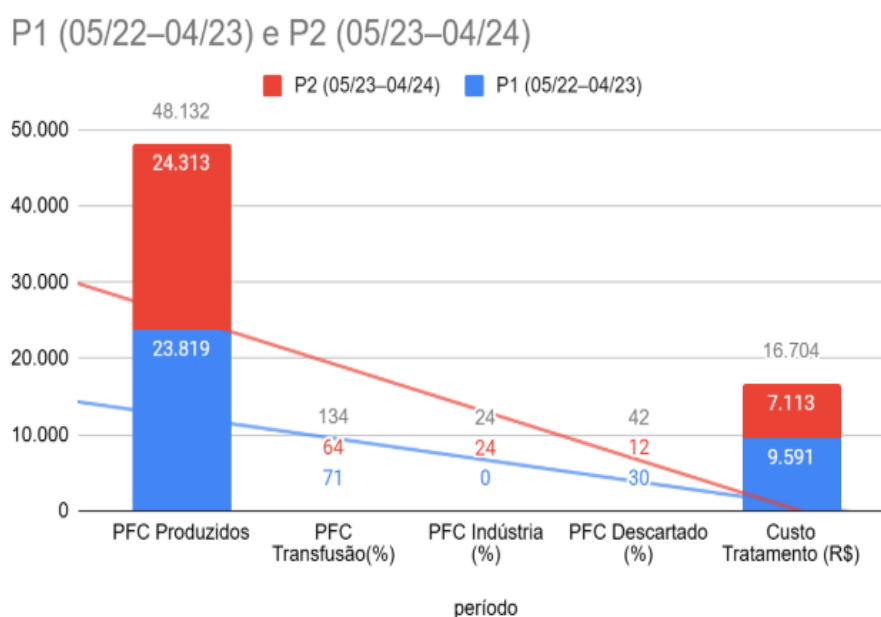
O Hemocentro Regional do Crato (HEMOCE), a implementação do Plano de Gerenciamento de Resíduos de Serviços de Saúde (PGRSS), associada ao uso do sistema INDICAH, possibilitou o acompanhamento sistemático da segregação e do volume de resíduos gerados. Os indicadores analisados revelaram uma média de 87% de segregação correta em 2020 e 95% em 2021, com melhorias significativas atribuídas a ações educativas *in loco* e a processos de capacitação contínua.

A análise dos índices de resíduos infectantes e comuns demonstrou que, excetuando-se três meses de aumento no descarte de plasmas frescos congelados (PFC), os valores mantiveram-se dentro das metas estabelecidas. A correção pontual desses desvios evidencia a eficácia do monitoramento contínuo como instrumento tanto preventivo quanto corretivo na gestão de resíduos.

3.5.2. Estratégias ESG para Redução de Resíduos Infectantes

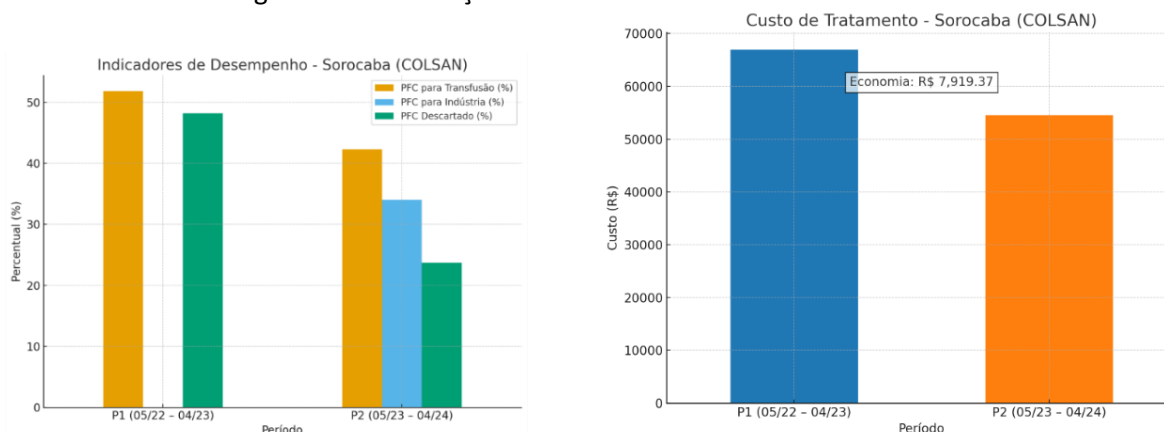
Os estudos realizados por Colsan (2024) e Hemonorte (2024) apontam para uma estratégia inovadora e eficaz na redução de resíduos infectantes: o envio de plasma excedente para a indústria de hemoderivados, Figuras 4, 5 e 6. Além de reduzir significativamente os volumes descartados, a prática gerou impactos financeiros positivos (Tokunaga *et al.*, 2024).

Figura 4 – Redução dos Custos com Resíduos Infectantes.



Fonte: Adaptado de Colsan (2024) e Hemonorte (2024).

Figura 5 e 6 – Redução dos Custos com Resíduos Infectantes



Fonte: Adaptado de Colsan (2024) e Hemonorte (2024).

Esses dados demonstram que, mesmo com aumento na produção de PFC, o descarte foi reduzido pela adoção de medidas baseadas em ESG, transformando resíduo em insumo produtivo e contribuindo com a economia circular.

3.5.3. Redução de Custos e Conformidade Ambiental

O caso do Hemonorte (2024) corrobora os resultados da Colsan, revelando uma redução acumulada de mais de R\$ 17.000,00 entre 2022 e 2024 com o redirecionamento de PFC para a indústria. Além da economia direta, a instituição passou a cumprir de forma mais eficaz a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), minimizando impactos ambientais e fortalecendo sua gestão institucional.

3.6. APLICAÇÕES E DESAFIOS

3.6.1. Aplicações na Indústria 4.0 e casos de sucesso em cidades inteligentes

A aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 – especialmente *IoT*, Inteligência Artificial (IA), *Big Data*, automação e *Blockchain* – tem proporcionado melhorias significativas para a gestão inteligente de resíduos industriais e sólidos urbanos.

Lanzalonga *et al.* (2024) apontam que, na promoção do uso de tecnologia na indústria e nos meios urbanos, a questão ambiental configura-se como uma exigência fundamental, sendo imprescindível que o crescimento tecnológico ocorra em harmonia com a preservação do meio ambiente. De acordo com Ferrer e Alba (2018) em cidades da Espanha, a implantação de sensores em lixeiras conectadas à rede *IoT* permitiu o monitoramento em tempo real do nível de resíduos. A partir do uso de algoritmos preditivos, a cidade conseguiu reduzir os custos logísticos em aproximadamente 30% e diminuir emissões de gases poluentes.

3.6.2. Desafios de implementação e barreiras

Segundo Ribeiro e Barros (2023), o desenvolvimento de plataformas digitais, como a *Upvalue*, requer a definição clara de requisitos técnicos e regulatórios, assim como mecanismos que assegurem qualidade, rastreabilidade e confiabilidade das informações. De forma complementar, Afshari (2024) ressalta que tecnologias da Indústria 4.0, incluindo *Big Data* e *IoT*, demandam uma abordagem holística, capaz de considerar não apenas os aspectos técnicos, mas também os impactos econômicos e ambientais associados à sua implementação.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa bibliográfica confirma que a integração de tecnologias como *IoT*, Inteligência Artificial e *Blockchain* está impulsionando um salto qualitativo na gestão de

resíduos ao nível industrial e urbano. Os comparativos de sistemas revelam ganhos significativos em eficiência de funcionamento, redução de custos, adequação e geração de valor *through economy* circular. Então, entraves técnico-regular e economicamente ainda têm de ser ultrapassados para que essas salvações venham generalizadamente ser implementadas em grande escala global. O alinhamento entre inovação tecnológica, governança ambiental e estratégias ESG emerge como mais provável caminho para impulsionar transformações eficazes da gestão de resíduos em um eixo estratégica da sustentabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP) pelo apoio institucional, à CAPES pelo financiamento através de bolsas de estudo e à FACEPE pelo suporte à pesquisa. O apoio conjunto dessas instituições foi fundamental para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BLOG EURECICLO. **Como a Inteligência Artificial tem transformado a economia circular.** Disponível em: <https://blog.eureciclo.com.br/inteligencia-artificial-e-economia-circular/>. Acesso em: 21/09/2025.
- LUDERMIR, T. B. **Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina: estado atual e tendências.** ESTUDOS AVANÇADOS 35 (101), 2021. DOI 10.1590/s0103-4014.2021.35101.007.
- MARANHÃO, R. A. **Inteligência artificial para gestão de resíduos em cidades inteligentes no contexto das mudanças climáticas: uma revisão da literatura.** Brazilian Journal of Animal and Environmental Research. Jun de 2024. ISSN: 2595-573X. DOI: 10.34188/bjaerv7n3-094.
- COSTA, B. S.; BERNADES, A. C. S.; PEREIRA, J. B. A.; ZAMPA, V. H.; PEREIRA, V. A.; MATOS, G. F.; SOARES, E. A.; SOARES, C. L.; SILVA, A. S. **Artificial Intelligence in Automated Sorting in Trash Recycling.** Conference: XV Encontro Nacional de Inteligência Artificial e Computacional. Out de 2018. DOI: 10.5753/eniac.2018.4416.
- FAVERI, L. A. M.; VIEIRA, I. K. C. **Aplicações de inteligência artificial em sistemas de coleta inteligente de resíduos: revisão da literatura.** Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade (2025): 12(30): 125-136. ISSN 2359-1412. Vol. 12, No 30, p. 125-136 - 30 abr. 2025. DOI 10.21438/rbgas(2025)123009.
- VALENTE, M. S.; COELHO, A. B. R.; ASSIS, R. S. A. **Sistema de detecção de resíduos em rios e nascentes utilizando visão computacional e inteligência artificial.** Revista de Gestão e Secretariado – GeSec, V. 15, N. 11, P. 01-20, 2024 5 São José dos Pinhais, Paraná, Brasil. ISSN: 2178-9010. DOI: <http://doi.org/10.7769/gesec.v15i11.4497>.

- ORTIZ, D.M.; CASTRO, S.A.; NIÑO, C.V.; GUEVARA, D.; MEDINA, B. **Identificación de residuos sólidos en zonas urbanas con procesamiento de imágenes e inteligencia artificial.** Revista ambiental água, aire y suelo. Resíduos sólidos en zonas urbanas. ISSN 1900-9178. Vol. 13 – Nº1 2022. Universidad de Pamplona.
- IBM. **O que é inteligência artificial (IA)?** Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/artificial-intelligence>. Acesso em: 21/09/2025.
- TOKUNAGA, J. T. S. *et al.* **Estratégia ESG para Redução de Resíduos Infectantes com o Envio de PFC para a Indústria.** *Hematology, Transfusion and Cell Therapy*, v. 46, n. S4, p. S1212, 2024. DOI: 10.1016/j.htct.2024.09.1212.
- SILVA, A. R. M. V. *et al.* **Impacts and Regulations of Healthcare Solid Waste Management during the COVID-19 Pandemic: A Systematic Review.** *Sustainability*, v. 15, art. 14462, 2023.
- DEVI, A. *et al.* **Resíduos urbanos inteligentes habilitados por IA e IoT: Sistema de Gestão para Cobrança Eficiente, Segregação e Descarte.** *E3S Web de Conferências*, v. 03002, 2025. ICSGET 2025.
- IRFAN, E.; CHAUDHARY, M. M.; RASOOL, W. **Sistema de gerenciamento de resíduos inteligente baseado em IoT (SWIMS).** Pré-impressão, janeiro 2025. DOI: 10.13140/RG.2.2.14871.89765.
- JERBI, H. *et al.* **Otimizando a gestão de resíduos em cidades inteligentes: uma abordagem baseada em IoT usando algoritmo de otimização de busca dinâmica de água americana (DBESO) e aprendizado de máquina.** *Revista de Gestão Urbana*, 2025.
- PIRES, L. *et al.* **Monitoramento em tempo real habilitado para IoT de Níveis de lixo urbano usando o tempo de Tecnologia de detecção de voo.** *Preprints.org*, 6 de março de 2025.
- MATURI, S. M.; DHANIKONDA, S. R.; GIDDALURU, S. **Lixeiras inteligentes: monitoramento em tempo real e Otimização para Gestão de Resíduos em Ambientes Inteligentes Cidades através de dispositivos IoT.** *Pesquisa em Engenharia, Tecnologia e Ciências Aplicadas*, v. 1, pág. 19246-19252, 2025
- AFSHARI, H.; GURTU, A.; JABER, M. Y. **Libertando o potencial da gestão de resíduos sólidos com economia circular e Indústria 4.0.** *Computers & Industrial Engineering*, 2024. doi: 10.1016/j.cie.2024.110457.
- FERRER, J.; ALBA, E. **BIN-CT: Urban Waste Collection Based in Predicting the Container Fill Level.** *arXiv preprint, arXiv:1807.01603*, 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1807.01603.pdf>. Acesso em: 21 set. 2025.
- LANZALONGA, F.; MARSEGLIA, R.; IRACE, A.; BIANCONE, P. **A aplicação da inteligência artificial na gestão de resíduos, compreendendo o potencial das abordagens baseadas em dados para o paradigma da economia circular.** *Management Decision*, 2024. doi: 10.1108/md-10-2023-1733.

- RIBEIRO, A.; BARROS, M. **Desafios do Mercado Digital de Resíduos – A Plataforma Upvalue.** Sustainability, 2023. doi: 10.3390/su151411235.
- SILVA, A. *et al.* **Resíduos industriais e saúde pública: uma abordagem integrada.** Revista FT, v. 15, n. 2, p. 30–44, 2023.
- COSTA, M.; LIMA, R. **Economia circular e inovação na indústria brasileira.** Cadernos de Gestão Ambiental, v. 18, n. 1, p. 22–38, 2021.

CAPÍTULO IV

APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM CONCRETOS COM ADIÇÕES MINERAIS: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL

USE OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE IN CONCRETE WITH MINERAL ADDITIVES: A SUSTAINABLE APPROACH

DOI: 10.51859/amplla.mas5450-4

Cristiane Carine dos Santos¹

Geraldo Cechella Isaia²

Willian Fernando de Borba³

¹ Doutora em Engenharia Civil. Professora do Departamento de Engenharia e Tecnologia Ambiental. Universidade Federal de Santa Maria - UFSM.

² Doutor em Engenharia Civil. Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.

³ Doutor em Engenharia Civil. Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.

RESUMO

A construção civil no Brasil é responsável por cerca de 14% do Produto Interno Bruto (PIB), mas por sua vez, gera consideráveis impactos ambientais, tanto pelo consumo de recursos naturais (cerca de 20 a 50% do consumo total), como pela geração de resíduos. A presente pesquisa visa analisar misturas de concreto com agregado residual de construção e demolição (RCD) através de ensaios de resistência à compressão axial. Os concretos estudados foram moldados com substituição de dois teores de agregado residual, o cimento também foi substituído parcialmente por dois tipos de pozolanas em misturas ternárias. Para os ensaios de resistência à compressão axial foram moldados corpos de prova cilíndricos e curados em câmara úmida por um período de 28 dias com relações a/mc de 0,35 ; 0,475 e 0,65. Também foi analisada a intensidades de ligantes e todos os resultados foram validados pela ANOVA. Através dos resultados pôde-se perceber que em relação ao traço referência (sem substituições), os concretos com pozolanas em misturas ternárias obtiveram resistência à compressão axial bem próximos do referência.

Palavras-chave: Concreto. RCD. Pozolanas.

ABSTRACT

Civil construction in Brazil is responsible for about 14% of the Gross Domestic Product (GDP), but in turn, generates considerable environmental impacts, both by the consumption of natural resources (about 20 to 50% of total consumption) and by generation of waste. The present research aims to analyze concrete mixtures with residual aggregate of construction and demolition (RCD) through tests of resistance to axial compression. The concretes studied were molded with replacement of two residual aggregate contents, the cement was also partially replaced by two types of pozzolans in ternary mixtures. For axial compressive strength tests cylindrical test specimens were molded and cured in a humid chamber for a period of 28 days with a / mc ratio of 0.35; 0.475 and 0.65. Binding intensities were also analyzed and all results were validated by ANOVA. From the results, it was possible to observe that in relation to the reference line (without substitutions), concrete with pozzolans in ternary mixtures obtained resistance to axial compression very close to the reference.

Keywords: concrete, RCD, pozzolans.

1. INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento do consumo dos recursos naturais em nível mundial, geram-se grandes preocupações em relação ao meio ambiente, principalmente à poluição do ar e da água, contaminação do solo, escassez de recursos não renováveis e mudanças climáticas, tornando a sustentabilidade um assunto em destaque quanto à qualidade de vida e a sobrevivência dos seres vivos.

A partir do Relatório Brundtland elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento no ano de 1987, definiu-se o desenvolvimento sustentável como a maneira que as gerações atuais conseguem satisfazer suas necessidades, sem comprometer que as futuras gerações também consigam satisfazer suas próprias necessidades (UNEP; SETAC, 2007), o que despertou preocupações com a escassez dos recursos naturais e a busca por maiores conhecimentos sobre esta realidade.

Um marco da história que impulsionou fortemente os impactos prejudiciais ao meio ambiente foi caracterizado pela Revolução Industrial no século XVIII, em que se buscou favorecer a qualidade de vida humana, refletindo no meio ambiente, mais especificamente na relação homem x natureza. A partir deste acontecimento a construção civil também alavancou principalmente com a descoberta do cimento Portland, contribuindo ainda mais para a exploração de recursos naturais e emissão de poluentes.

Com o intuito de reduzir os impactos causados ao meio ambiente devido às atividades humanas, grande parte dos segmentos da sociedade tem buscado repensar suas estratégias de produção, principalmente o setor da construção civil que é um dos maiores consumidores de recursos naturais e geradores de resíduos. Relacionado a este contexto surgiram a algum tempo inúmeras pesquisas objetivando substituir recursos naturais por materiais alternativos, entre eles a reutilização de resíduos de construção e demolição (RCD) gerados pela própria construção civil, bem como o uso de resíduos agroindustriais, como cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana, cinza volante, entre outros materiais. Pois com a aplicação destes estudos haveria a possibilidade de prolongar por um maior período de tempo o ciclo de vida dos recursos naturais que são utilizados em grande quantidade pela construção civil.

Com o aumento da produção de concreto, conseqüentemente aumenta-se o consumo de cimento Portland, que é um dos seus principais materiais constituintes e que mais polui o meio ambiente, sendo a indústria cimenteira considerada pelo Portal Odm-Fiep (2012) o setor

responsável por cerca de 5% das emissões de CO₂ lançadas na atmosfera. Entretanto, conforme o Sindicato Nacional da indústria do Cimento (SNIC) pode-se considerar que mais de 50% das emissões de CO₂ pela indústria de cimento deve-se aos processos de produção, ocorrendo durante a transformação físico-química do calcário em clínquer, que é o principal constituinte do cimento. Dessa forma, as altas emissões geradas pelo clínquer ocorrem devido à participação do calcário em sua produção, já que parte dele se transforma em CO₂.

A intensa demanda por concreto tem como consequência o enorme consumo de cimento, que é um dos seus principais constituintes. Os dados apresentados pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (BRASIL, 2015) apontam que a quantidade de cimento consumida no ano de 2014 teve um aumento de 1,8% em relação ao ano anterior, chegando a uma margem de 350 kg de cimento por habitante. Por sua vez The European Cement Association (CEMBUREAU, 2013) enfatiza que o cimento é responsável por aproximadamente 5% das emissões globais de gases do efeito estufa, pois para a sua produção necessita-se de energia (combustíveis e eletricidade), liberando assim CO₂ e outros gases.

Nos últimos anos a indústria da construção civil tem buscado, de maneira constante e bastante insistente utilizar materiais alternativos com o objetivo de atender aos requisitos para o desenvolvimento sustentável. Entre esses materiais destacam-se as pozolanas, que são definidas pela NBR 12653 (2015) como materiais silicosos ou silicoaluminosos, que possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas quando divididas e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

Com o intuito de reduzir o impacto ambiental global por meio da redução das emissões de CO₂, existem estudos sobre a utilização de adições minerais, pois além de diminuir os custos quando incorporadas ao cimento Portland, também melhoram as propriedades do concreto e contribuem para a sustentabilidade. Desta forma, Metha e Monteiro (2008) afirmam que as adições minerais melhoram as propriedades do concreto, como a microestrutura, reduzem a segregação e exsudação devido à segmentação dos canais de percolação da água e promovem o aumento de locais de nucleação para os produtos de hidratação, fazendo com que a pasta fique mais homogênea. Com isso, os grãos menores, por efeito físico, diminuem o efeito parede na zona de transição devido ao empacotamento dos poros, promovendo o aumento da resistência.

A indústria da construção civil é um dos setores mais importantes para o desenvolvimento econômico e social de um país, no Brasil é responsável por cerca de 14% do Produto Interno Bruto (PIB), mas por sua vez, gera consideráveis impactos ambientais, tanto pelo consumo de recursos naturais (cerca de 20 a 50% do consumo total), como pela geração de resíduos (PAZ E LAFAYETTE, 2016).

Este trabalho teve como objetivo geral estudar o comportamento da resistência a à compressão axial do concreto diante da substituição de RCD e adições minerais em vistas a sustentabilidade.

2. METODOLOGIA

2.1. MATERIAIS

2.1.1. Materiais cimentícios

Foi utilizado o cimento Portland CPV-ARI da marca Itambé, produzido em território nacional, conforme a norma NBR 5733: 1991. Como substituição parcial do cimento utilizou-se cinza de casca de arroz (CCA) proveniente da região de Santa Maria – RS, em que a mesma foi queimada a céu aberto (sem controle de temperatura) e a cinza volante (CV), proveniente da usina termoelétrica de Candiota, ambas foram moídas durante 1 hora em moinho de bolas.

2.1.2. Agregados

Foram utilizados agregados graúdos e miúdos. Como agregado graúdo empregou-se brita com fração retida entre as peneiras 19 e 4,8mm, proveniente da cidade de Itaara – RS, e como substituição parcial deste agregado utilizou-se resíduos de construção e demolição (RCD), provenientes da empresa GR2 de Santa Maria – RS. Como agregado miúdo foi utilizado areia com granulometria entre 4,8 e 0,15mm do rio Vacacaí de Santa Maria – RS.

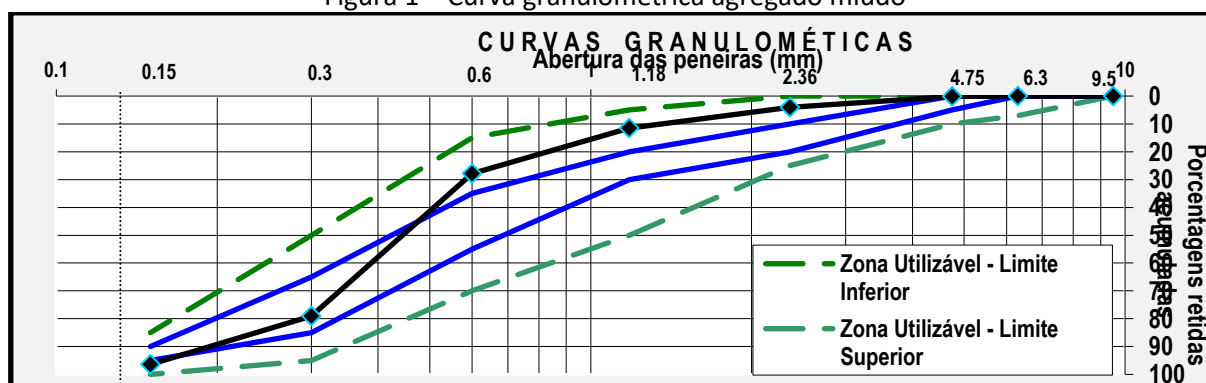
Na Tabela 1 está representada a caracterização física dos agregados, e nas Figuras 1, 2 e 3 as curvas granulométricas do agregado miúdo, graúdo e RCD, respectivamente.

Tabela 1 – Características físicas do agregado graúdo e miúdo e do RCD

Características Físicas	Areia	Brita	RCD
Massa específica (g/cm ³)	2,65	2,49	1,98
Massa unitária, (g/cm ³)	1,57	1,36	1,02
Módulo de finura	2,19	6,96	6,35
D. máx. característico (mm)	2,36	19	19
Absorção do agregado (%)	0,33	2,18	9,52
Índice de forma	-	1,59	3,24

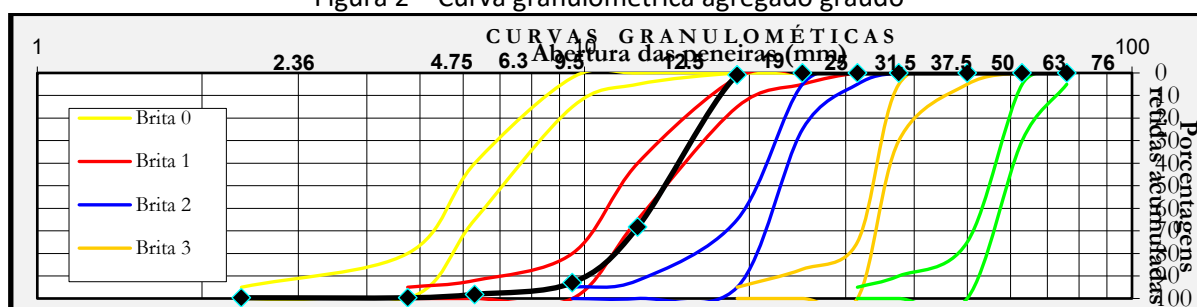
Fonte: autores.

Figura 1 – Curva granulométrica agregado miúdo



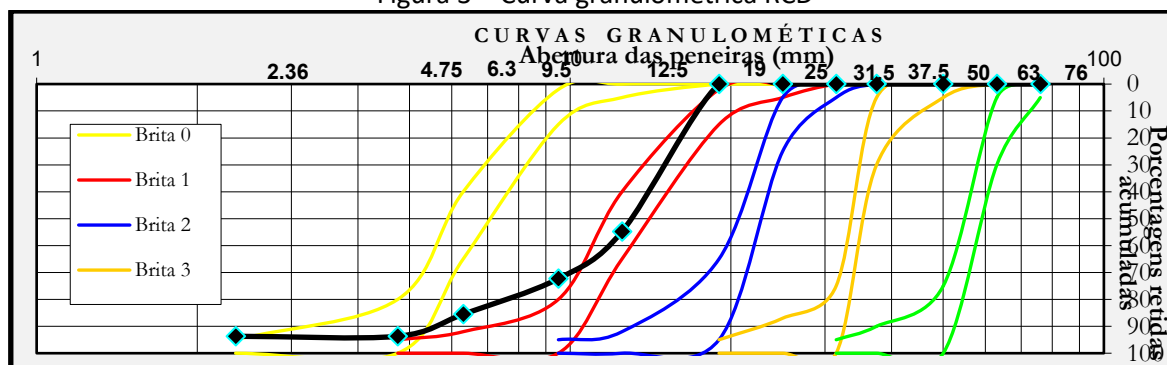
Fonte: autores.

Figura 2 – Curva granulométrica agregado graúdo



Fonte: autores.

Figura 3 – Curva granulométrica RCD



Fonte: autores.

Os RCD foram primeiramente classificados antes de serem britados, em que se separou os materiais que poderiam substituir o agregado graúdo, como pedaços de concreto, argamassa, cerâmica, sendo que os demais como madeira, plásticos, gesso, papéis, entre outros, foram descartados, na Tabela 2 estão as porcentagens de cada um desses materiais. O emprego dos RCD ao concreto deu-se com superfície saturada seca (SSS), devido a sua alta capacidade de absorção de água.

Tabela 2 – Classificação do RCD em porcentagem

Classificação dos RCD (%)		
Concreto, argamassa e cerâmica	Piso Cerâmico	Outros
92,82	3,44	3,74

Fonte: autores.

2.1.3. Aditivo químico redutor de água

Com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade do concreto foi utilizado aditivo hiperplastificante MasterGlenium54, fornecido pela BASF The Chemical Company obedecendo as prescrições das normas ABNT NBR 10908:2009 e ABNT NBR 11768:2011.

2.2 DOSAGEM DO CONCRETO

O estudo de dosagem do concreto foi realizado de acordo com o método proposto por Helene e Terzian (1992), em que foi fixada a resistência característica para o concreto de 25 MPa. Devido a diminuição da resistência à compressão axial do concreto obtida em ensaios preliminares pelos traços com substituições de 15 e 30% de RCD empregaram-se pozolanas para tentar compensar esta queda, e também além das moldagens com o cimento CP V- ARI foram produzidos concretos com o cimento CP IV. Para obter a curva de Abrams foram adotadas três relações água/materiais cimentícios (a/mc), 0,35, 0,475 e 0,65, abatimento do tronco de cone de 100 ± 20 mm, e ainda para melhorar a consistência do concreto utilizou-se aditivo redutor de água em algumas misturas.

O teor de água/materiais secos foi estabelecido em $H \text{ (kg/kg)} = 8,22\%$ e argamassa seca $\alpha \text{ (kg/kg)} = 0,5$, em que esses dados foram fixados para todos os traços preliminares para possibilitar a realização dos cálculos dos traços unitários de concreto para cada relação água/materiais cimentícios (a/mc). De acordo com a ABNT NBR 12655: 2015 adotou-se desvio padrão de $S_d = 4$ MPa, determinando assim, para a resistência característica estabelecida ($f_{ck} = 25 \text{ MPa}$), a resistência aos 28 dias de $f_{28} = 31,6$ MPa. Para possibilitar o traçado da curva de Abrams, foram ensaiados os traços de concreto para as três relações água/materiais cimentícios (a/mc) diferentes, através da moldagem de 4 corpos de prova cilíndricos de $10 \times 20 \text{ mm}$ para cada um dos traços de concreto. Após a desmoldagem os corpos de prova foram levados à câmara úmida para serem curados durante 28 dias, conforme prescreve a norma ABNT NBR 5738: 2016. Depois do período de cura os mesmos foram retificados e submetidos aos ensaios de resistências à compressão axial, de acordo com a norma ABNT NBR

5739: 2007. As Tabelas 3 e 4 demonstram a quantidade de materiais por m³ dos traços estudados.

Tabela 3 – Quantidade de materiais por m³ dos traços referências

TRAÇO X=0,35	REFERÊNCIA	TRAÇO X=0,475	REFERÊNCIA	TRAÇO X=0,65	REFERÊNCIA
cimento=	512,74	cimento=	374,91	cimento=	272,63
areia=	579,40	areia=	708,58	areia=	804,25
brita=	1092,14	brita=	1083,48	brita=	1076,87
água=	179,46	água =	178,08	água=	177,21

Fonte: autores.

Tabela 4 – Quantidade de materiais por m³ dos traços contendo RCD, CCA e CV

X=0,35		X=0,475		X=0,65	
15%RCD + 15%CCA +10%CV					
cimento=	504,16	cimento=	368,75	cimento=	268,16
areia=	519,29	areia=	660,06	areia=	764,25
brita=	912,53	brita=	907,12	brita=	901,01
água=	176,46	água=	175,16	água=	174,30
Cca=	75,62	Cca=	55,31	Cca=	40,22
Cv=	50,42	Cv=	36,87	Cv=	26,82
RCD=	161,33	RCD=	158,56	RCD=	158,21
30%RCD + 15%CCA +10%CV					
cimento=	495,89	cimento=	249,56	cimento=	181,70
areia=	510,76	areia=	446,72	areia=	517,84
brita=	738,87	brita=	511,60	brita=	1006,61
água=	173,56	água=	118,54	água=	118,10
Cca=	74,38	Cca=	37,43	Cca=	27,25
Cv=	49,59	Cv=	24,96	Cv=	18,17
RCD=	317,37	RCD=	431,74	RCD=	430,63

Fonte: autores.

2.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os ensaios de compressão axial foram executados com aplicação da força centrada no topo e na base dos modelos, a uma taxa de 0,5KN/seg.

O valor da resistência à compressão axial será obtido colocando os corpos de prova em uma prensa com capacidade de 200 toneladas, sendo o resultado de ruptura indicado no próprio sistema, seguindo a norma ABNT NBR 5739 (2007) para o ensaio de compressão axial dos corpos de prova.

2.3. INTENSIDADE DOS LIGANTES

Pela diminuição mundial de clínquer deve-se prezar, pela diminuição do consumo total de ligantes. Por esta razão é proposto um segundo indicador de eficiência ambiental do concreto: a Intensidade de Ligantes (IL), que relaciona o consumo total de ligantes do concreto (impacto) em kg.m^3 , com a resistência à compressão (desempenho), em MPa, conforme a Equação 1.

$$IL = I / r_c \quad \text{Equação (1)}$$

Onde I é o consumo total de ligantes do concreto, em kg.m^3 , e r_c é o requisito de desempenho – resistência à compressão axial aos 28 dias.

Quanto maior o IL, maior o teor de ligantes necessários para a realização da mesma função e, portanto, menor a eco-eficiência do concreto.

2.5 ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Para maior confiabilidade nos dados foi realizado um tratamento estatístico dos resultados de resistência à compressão axial e intensidade dos ligantes por meio da aplicação de análise de variância (ANOVA) para 95% de confiabilidade dos resultados adquiridos.

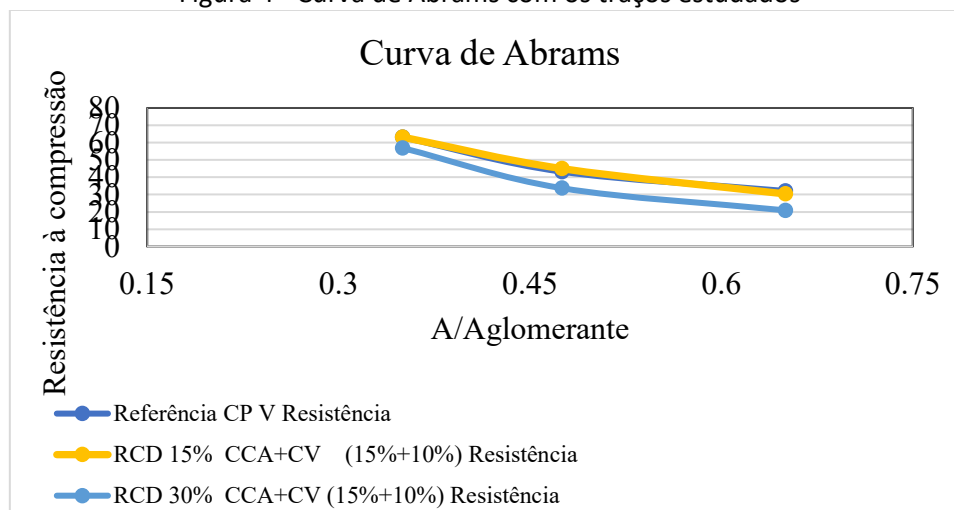
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios obtidos no programa experimental.

3.1. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL

Para possibilitar o traçado da curva de Abrams, foram ensaiados os traços de concreto para as três relações água/materiais cimentícios (a/mc) diferentes, através da moldagem de 4 corpos de prova cilíndricos de 10x20mm para cada um dos traços de concreto. Após os rompimentos dos corpos de prova houve a possibilidade do traçado da curva de Abrams demonstrado na Figura 4.

Figura 4 - Curva de Abrams com os traços estudados



Fonte: autores.

Os resultados para o ensaio de Resistência à Compressão Axial (média) para as diferentes substituições e relações água/materiais cimentícios (a/mc) são apresentados na Tabela 5 a seguir, a qual apresenta o gráfico dos resultados para substituição de 15% e 30% do agregado graúdo natural pelo RCD, bem como, para as misturas ternárias.

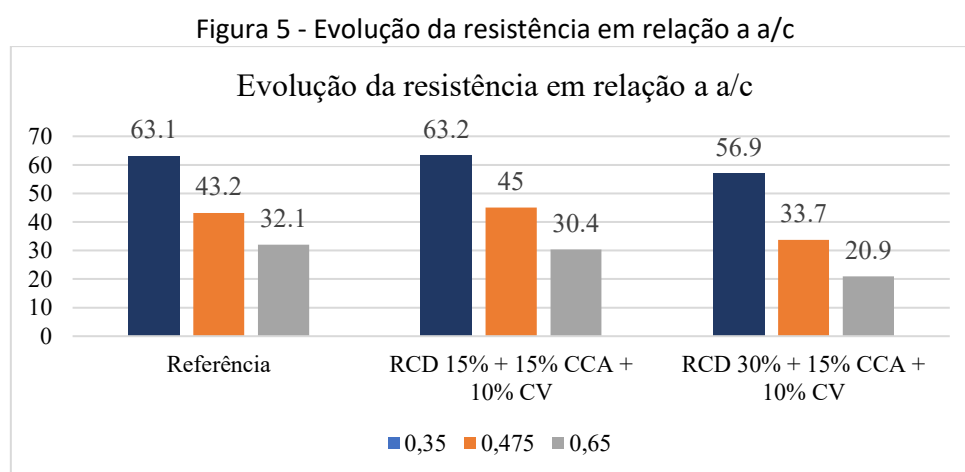
Tabela 5 – Resultados compressão axial aos 28 dias

Referência CP V	
a/c	Resistência (MPa)
0,35	63,1
0,475	43,2
0,65	32,1
RCD 15% CCA+CV (15%+10%)	
a/c	Resistência (MPa)
0,35	63,2
0,475	45,0
0,65	30,4
RCD 30% CCA+CV (15%+10%) (MPa)	
a/c	Resistência
0,35	56,9
0,475	33,7
0,65	20,9

Fonte: autores.

Com base nos resultados de resistência a compressão axial obtidos aos 28 dias pode-se afirmar de forma geral que a mistura com 15% de RCD, 15% de CCA e 10% de CV com um fator a/c de 0,475 apresentou melhor desenvolvimento em relação a mistura de referência,

assim como, quando comparadas as misturas com as devidas substituições. Pode-se observar conforme aumentou-se para 30% a substituição do agregado diminuiu-se a resistência para todas as relações a/c, isso é devido a alta absorção que esse agregado possui aumentando sua porosidade. Outra propriedade do concreto que também sofre modificação com a utilização do agregado reciclado é a massa específica. Nos estudos realizados por Poon e Chan (2006) percebe-se que, conforme o teor de substituição dos agregados naturais pelos reciclados aumenta, ocorre uma diminuição gradual da massa específica do concreto estudado. Silva et al. (2015) atribuem essa redução à maior porosidade do agregado reciclado, principalmente com teores crescentes de substituições. A figura 5 demonstra a evolução de resistência em relação á a/c.



Fonte: autores.

O objetivo principal da Análise da Variância foi verificar o nível de significância entre grupos, isto é, se existem diferenças significativas entre médias de grupos diferentes. Os dados são lançados em programas computacionais, que apresentam a soma, a média e a variância, como também a soma dos quadrados, os graus de liberdade, as médias quadráticas e o teste F. É comparado o valor F com o F crítico ou tabelado. Se F for maior que o valor tabelado, conclui-se que existem diferenças significativas entre grupos, isto é, os fatores que estão sendo comparados possuem influência no resultado que está sendo analisado.

A Tabela 4 apresenta o resumo e a Tabela 5 as análises feitas pela ferramenta ANOVA em relação aos resultados de compressão axial.

Tabela 4 – Resumo resistência à compressão axial

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Referência	3	138,40	46,13	246,70
RCD 15%	3	138,60	46,20	270,04
RCD 30%	3	111,50	37,17	333,01

Fonte: autores.

Tabela 5 – Dados ANOVA compressão axial

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	162,01	2	81,00	0,29	0,76	5,14
Dentro dos grupos	1699,51	6	283,25			
Total	1861,52	8				

Fonte: autores.

A anova confirmou que não houve diferenças significativas entre as resistências à compressão axial. Demonstrando que o agregado reciclado não incrementou a resistência à compressão axial com significância.

3.2. INTENSIDADE DOS LIGANTES

É a quantidade de ligantes (impacto) necessária para produzir 1 unidade de resistência (desempenho). A tabela 6 apresenta a intensidade total de ligantes das misturas e a tabela 9 a intensidade de ligantes em relação ao consumo de cimento.

Tabela 6 – Intensidade dos ligantes com consumo total de ligantes

Referência CP V	
a/c	Intensidade dos ligantes
0,35	8,13 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,475	8,68 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,65	8,49 kg.m⁻³.MPa⁻¹
RCD 15% CCA+CV (15%+10%)	
a/c	Intensidade dos ligantes
0,35	9,97 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,475	10,24 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,65	11,03 kg.m⁻³.MPa⁻¹
RCD 30% CCA+CV (15%+10%)	
a/c	Intensidade dos ligantes
0,35	10,89 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,475	9,26 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,65	10,87 kg.m⁻³.MPa⁻¹

Fonte: autores.

Pode-se identificar levando em consideração o consumo total de ligantes que a mistura com 15% de RCD, 15% de CCA e 10% de CV com fator a/c de 0,65 apresentou a maior quantidade de ligante (impacto). Quando comparados a mistura de referência a mistura com fator a/c de 0,35 apresentou uma progressão no consumo de ligantes em aproximadamente 25%, em contrapartida as misturas com fator a/c 0,475 e 15% de RCD, 15% de CCA e 10% de CV apresentou uma progressão em relação a mistura de referência de 18% e a mistura com 30% de RCD, 15% de CCA e 10% de CV uma regressão de 9,57% em relação a mistura com 15% de RCD, 15% de CCA e 10% de CV e uma progressão de 6,2% em relação a mistura de referência. Mesmo comportamento pode ser verificado com o fator a/c 0,65.

A Tabela 7 apresenta o resumo e a Tabela 8 as análises feitas pela ferramenta ANOVA em relação ao consumo total de ligantes.

Tabela 7 – Resumo Intensidade dos ligantes com consumo total de ligantes

RESUMO				
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
	3	1,48	0,49	0,02
Referência	3	25,30	8,43	0,08
RCD 15%	3	31,24	10,41	0,30
RCD 30%	3	31,02	10,34	0,87

Fonte: autores.

Tabela 8 – ANOVA Intensidade dos ligantes com consumo total de ligantes

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	199,55	3	66,52	208,01	0,00	4,07
Dentro dos grupos	2,56	8	0,32			
Total	202,10	11				

Fonte: autores.

Tabela 9 – Intensidade dos ligantes apenas com consumo de cimento

Referência CP V	
a/c	Intensidade dos ligantes
0,35	8,13 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,475	8,68 kg/m³.MPa
0,65	8,49 kg/m³.MPa
RCD 15% CCA+CV (15%+10%)	
a/c	Intensidade dos ligantes
0,35	7,98 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,475	8,19 kg.m⁻³.MPa⁻¹
0,65	8,82 kg.m⁻³.MPa⁻¹
RCD 30% CCA+CV (15%+10%)	
a/c	Intensidade dos ligantes
0,35	8,72 kg.m⁻³.MPa⁻¹

0,475	7,41 kg.m ⁻³ .MPa ⁻¹
0,65	8,69 kg.m ⁻³ .MPa ⁻¹

Fonte: autores.

Observa-se que o melhor desempenho apresentado foi na mistura com 30% de RCD, 15% de CCA e 10% de CV com fator a/c de 0,475 com uma intensidade de ligante inferior a mistura de referência em aproximadamente 15%. A maior intensidade de ligante pode ser verificada na mistura com 15% de RCD, 15% de CCA e 10% de CV e um fator a/c de 0,65, com uma intensidade de ligante superior a mistura de referência em aproximadamente 4%.

A Tabela 10 apresenta o resumo e a Tabela 11 as análises feitas pela ferramenta ANOVA em relação ao consumo de cimento.

Tabela 10 – Resumo Intensidade dos ligantes apenas com consumo de cimento

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
	3	1,48	0,49	0,02
Referência	3	25,30	8,43	0,08
RCD 15%	3	24,99	8,33	0,19
RCD 30%	3	24,82	8,27	0,56

Fonte: autores.

Tabela 11 – ANOVA Intensidade dos ligantes apenas com consumo de cimento

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	138,83	3	46,28	217,49	0,00	4,07
Dentro dos grupos	1,70	8	0,21			
Total	140,53	11				

Fonte: autores.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram analisadas misturas de concreto com teores de substituição do cimento por cinza de casca de arroz (CCA) e cinza volante (CV), assim como o agregado natural por resíduos de construção e demolição (RCD), a fim de avaliar a resistência à compressão axial aos 28 dias e intensidade de ligantes em relação ao consumo total de materiais e somente do cimento, com o intuito de reduzir seu uso, tornando tais misturas menos agressivas ao meio ambiente.

Através das análises dos resultados pode-se concluir que é possível obter a resistência desejada utilizando misturas com adições minerais e RCD aos 28 dias de idade.

A resistência a compressão axial apresentou melhor desempenho na mistura com 15% de RCD, 15% de CCA e 10% de CV com um fator a/c de 0,475. Analisando-se a intensidade de

ligantes em relação ao consumo total dos materiais, de maneira geral não apresentou contribuições significativas para ambas misturas quando comparadas com a mistura de referência. A intensidade em relação somente ao consumo de cimento o melhor desempenho foi obtido pela mistura com 15% de RCD, 15% de CCA e 10% de CV com um fator a/c de 0,35. Tais afirmações podem ser comprovadas pela ferramenta ANOVA.

Para Vieira e Dal Molin (2004) a utilização de agregados reciclados em concretos não afetam a sua resistência à compressão e a durabilidade, mas enfatizam a importância dos tratamentos deste material, desde o beneficiamento até o momento da utilização, fazendo com que suas propriedades sejam conhecidas e as limitações de seu uso diminuam.

Contudo, a utilização desse material como forma de substituição parcial do agregado natural para a produção de concreto exige amplos conhecimentos sobre as suas propriedades, bem como das consequências quando inserido ao novo material. Neste contexto, aprofundar os conhecimentos e explorar as propriedades resultantes deste concreto tanto no estado fresco como no endurecido são fatores básicos que orientam a utilização deste produto.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653/2015.

Materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

____. NBR 5733 - **Cimento Portland de alta resistência inicial.** Rio de Janeiro; ABNT, 1991.

____. NBR 12655 - **Concreto de cimento Portland. Preparo, controle e recebimento.**

Procedimento. ABNT, Rio de Janeiro. 2015.

____. NBR 5738 - **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.** Rio de Janeiro; ABNT, 2016.

____ NBR 5739 - **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.**
Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

____ NBR 10908 - **Aditivos para argamassa e concreto - Ensaio de caracterização.**
Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

____ NBR 11768 - **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos.**
Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

- BRASIL. **Sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil**, 2015. Disponível em: < www.caixa.gov.br/sinapi >. Acesso em: 15 julho de 2018.
- CEMBUREAU. THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION. **The role of cement in the 2050 low carbon economy**. 2013. 64 p.
- DAMINELI, B. L. KEMEID, F. M. AGUIAR, P. S.; JOHN, VANDERLEY M. **Measuring the eco-efficiency of cement use**. Cement and Concrete Composites, v. 32, n. 8, p. 555-562, 2010
- HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo, 1992.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (2008). **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 3.ed.
- PAZ, D.H.F., LAFAYETTE, K.P.V., 2016. **Forecasting of construction and demolition waste in Brazil**. Waste Manag. Res. 34 (8), 708e716.
- PORTAL ODM. **Acompanhamento municipal dos objetivos de desenvolvimento do milênio**. Disponível em: <www.portalodm.com.br/FIEP>. Acesso em: 15 de junho de 2018.
- UNEP; SETAC. UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME- SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY. **Life cycle management: a business guide to sustainability**. Paris, 2007. 51 p.

CAPÍTULO V

TRANSFORMAÇÃO SOCIAL E SUSTENTABILIDADE: UM RELATO DE EXPERIÊNCIA SOBRE TECNOLOGIAS RENOVÁVEIS IMPLANTADAS NO SÍTIO FURNAS, MONTADAS- PB E NO SÍTIO BENEFÍCIO, ESPERANÇA-PB

SOCIAL TRANSFORMATION AND SUSTAINABILITY: AN EXPERIENCE REPORT ON RENEWABLE TECHNOLOGIES IMPLEMENTED AT THE FURNAS SITE, MONTADAS-PB AND AT THE BENEFÍCIO SITE, ESPERANÇA-PB

DOI: 10.51859/ampla.mas5450-5

Karolina Rose Souza Ferreira ¹
Yasmim Sophia Costa da Rocha ²
Raquel da Silva Guedes ³

¹ Estudante do curso de Sistemas de Energia Renovável. Instituto Federal da Paraíba – IFPB

² Estudante do curso de Sistemas de Energia Renovável. Instituto Federal da Paraíba – IFPB

³ Doutoranda, mestra, bacharel e licenciada em História pela Universidade Federal de Pernambuco e Universidade Federal de Campina Grande; Graduada em Psicologia pela Universidade Estadual da Paraíba. Pesquisadora de Gênero, Memória e História Oral.

RESUMO

Esse artigo é resultado de pesquisas realizadas com o objetivo de analisar os impactos sociais e econômicos de tecnologias sociais e renováveis implantadas no Sítio Furnas que fica no município de Montadas/PB e no Sítio Benefício que se localiza em Esperança/PB, como proposta final do curso “Sistemas de Energia Renovável” do Instituto Federal da Paraíba (IFPB). A procura por inovações tecnológicas à serem aplicadas em comunidades que dependem predominantemente da agricultura familiar como fonte de renda vem se expandindo, decorrente da necessidade de promover melhorias na produção agrícola e nas condições de vida e execuções das atividades braçais, a fim de otimizar a produção e o cotidiano dos(as) moradores(as), gerando economia e uma melhor qualidade de vida. Objetiva-se relatar, a partir da História Oral, as experiências vivenciadas no processo de compreensão a respeito das mudanças obtidas com a implantação das tecnologias nas comunidades em diferentes aspectos, por meio de entrevistas com pessoas selecionadas e pela sua análise. Os resultados obtidos durante e ao término das pesquisas e análises feitas nas comunidades contribuintes, mostram a notável importância das

tecnologias renováveis no processo de desenvolvimento, ampliação e avanço da produção agrícola, deixando em evidência a necessidade de tornar mais acessível a obtenção dessas inovações, através de projetos que subsidiam esse processo. Ao final da experiência, pode-se concluir que as tecnologias renováveis têm potencial para melhorar a produção agrícola e a qualidade de vida dos agricultores familiares, com a necessidade de tornar melhor e mais inclusivo o acesso a elas, visando o seu papel notável no desenvolvimento sustentável das comunidades rurais.

Palavras-chave: Agricultura-familiar. Impacto-socioeconômico. Tecnologias-renováveis.

ABSTRACT

This article reports research conducted to analyze the social and economic impacts of social and renewable technologies implemented in Sítio Furnas - Montadas/PB and Sítio Benefício - Esperança/PB, as the final project of the course “Renewable Energy Systems” at the Federal Institute of Paraíba (IFPB). The search for technological innovations to be applied in communities that rely predominantly on family



farming as their main source of income has been expanding, driven by the need to improve agricultural production, living conditions, and manual labor activities, in order to optimize productivity and the daily lives of residents, generating savings and a better quality of life. The objective is to report, through Oral History, the experiences lived in the process of understanding the changes brought by the implementation of these technologies in different aspects, through interviews with selected individuals and their analysis. The results obtained during and at the end of the research and analyses carried out in the participating communities highlight the remarkable importance of renewable technologies in the

process of development, expansion, and advancement of agricultural production, emphasizing the need to make the access to these innovations more feasible, through projects that support this process. At the end of the experience, it can be concluded that renewable technologies have the potential to improve agricultural production and the quality of life of family farmers, with the need to make access to them broader and more inclusive, given their significant role in the sustainable development of rural communities.

Keywords: Family-farming. Socioeconomic-impact. Renewable-technologies.

1. INTRODUÇÃO

A busca por alternativas sustentáveis tem se intensificado nas últimas décadas, à medida que se tornam mais urgentes os desafios ambientais e sociais, como os causados pelos impactos das atividades humanas, principalmente no espaço rural. Nesse contexto, as tecnologias renováveis surgem como instrumentos capazes de promover o desenvolvimento sustentável e fortalecer a agricultura familiar, um dos pilares da produção alimentar do Brasil. Segundo o Instituto de Tecnologia Social (ITS), as tecnologias sociais correspondem a um “conjunto de técnicas e metodologias transformadoras, desenvolvidas e/ou aplicadas na interação com a população e apropriadas por ela, que representam soluções para inclusão social e melhoria das condições de vida” (ITS, 2004, p. 25). Essa definição destaca o teor de possibilidade de inovação, oferecido pela implantação dessas tecnologias, chegando em dimensões sociais e colaborativas, tornando-se meios de transformação e desenvolvimento das realidades locais.

No Estado da Paraíba, a adoção de tecnologias renováveis em pequenas propriedades rurais tem se mostrado uma estratégia promissora para ampliar a produtividade agrícola e melhorar as condições de vivência e atividade das famílias agricultoras. Borges (2017)

evidencia que o uso de sistemas como biodigestores¹ e bio-águas² favorece o aproveitamento racional de recursos naturais, reduz custos de produção e contribui para a sustentabilidade ambiental das atividades agrícolas. Essas práticas, além de aumentarem o uso de energia limpa e renovável, também estimulam a autonomia no cotidiano dos agricultores e agricultoras e o fortalecimento das comunidades rurais.

No entanto, a implantação das tecnologias renováveis ainda tem seus desafios como a dificuldade de acesso aos equipamentos e projetos que subsidiam essas inovações, esses são fatores que podem comprometer a efetividade no cotidiano dos agricultores e agricultoras. Esse cenário é descrito em estudos que analisam experiências de implantação em comunidades rurais, apontando que a implantação e desenvolvimento só se concretiza quando há apoio institucional e acompanhamento técnico (Carvalho e Lago, 2019).

De acordo com o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID, 2019), experiências bem-sucedidas tendem a ser efetivas entre comunidades rurais, desde que sejam acompanhadas de políticas públicas inclusivas e incentivos adequados à inovação social. Nesse cenário, a agricultura familiar permanece como eixo central do desenvolvimento rural sustentável, sendo responsável por parcela significativa da produção de alimentos consumidos no país. No entanto, sua continuidade depende do acesso a recursos tecnológicos, crédito e formação técnica.

Apesar disso, a introdução dessas tecnologias não se dá sem obstáculos. Por isso, analisar como essas tecnologias renováveis afetam o cotidiano das pessoas que moram onde essas inovações foram instaladas se torna essencial. Para isso, a participação das pessoas que às vivenciam é um meio para analisar as percepções sobre as mudanças obtidas a partir do uso das tecnologias renováveis na agricultura familiar. Para esse trabalho, fizemos uso da História Oral como metodologia principal, por meio de entrevistas autorizadas pelos

¹ O biodigestor é um equipamento fechado dentro do qual o material orgânico hidratado se decompõe por digestão anaeróbia. Isso significa que, quando não há a presença de oxigênio, bactérias anaeróbias fazem a decomposição da matéria úmida orgânica que está no biodigestor. Por um processo de fermentação, ocorre a formação de biogás e biofertilizante. Disponível em: <https://www.superbac.com.br/blog/entenda-o-que-sao-biodigestores-e-como-eles-funcionam/#:~:text=O%20biodigestor%20%C3%A9%20um%20equipamento,org%C3%A2nica%20que%20est%C3%A1%20no%20biodigestor> Acesso em: 15 out. 2025.

² A tecnologia de reúso de água servida a partir do Bioágua Familiar consiste num processo de filtragem por mecanismos de impedimento físico e biológico dos resíduos presentes na água cinza. A água de reúso é utilizada num sistema fechado de irrigação destinado à produção de hortaliças, frutas, plantas medicinais, jardins dentre outras. Disponível em: https://www.noclimadacaatinga.org.br/wp-content/uploads/no_clima_da_caatinga_cartilha_bioagua.pdf Acesso em: 16 out. 2025.

participantes, essa que conforme dito por Xavier et al. (2020), constitui um método essencial para o registro das percepções e memórias dos indivíduos, possibilitando a construção de um conhecimento baseado nas vivências dos participantes.

Diante disso, este artigo busca relatar e analisar as experiências vivenciadas durante a pesquisa realizada nos Sítio Furnas (Montadas/PB) e no Sítio Benefício (Esperança/PB), onde foram implantadas tecnologias sociais e renováveis, como o biodigestor, o sistema de reúso de água e o fogão ecológico. Por meio da metodologia da História Oral, objetiva-se compreender os impactos sociais, econômicos e ambientais dessas inovações no cotidiano das comunidades, refletindo sobre seus benefícios, desafios e potencial de transformação. Vale salientar ainda que as entrevistas foram autorizadas e assinadas em Termos de Consentimento Livre e Esclarecido.

2. IMPACTOS DAS TECNOLOGIAS RENOVÁVEIS E MUDANÇAS NAS COMUNIDADES

Ao iniciarmos nossa experiência, fomos conduzidas por meio da disciplina técnica “Projeto Integrador em Sistemas de Energia Renovável” pertencente ao curso técnico de Sistemas de Energia Renovável integrado ao Ensino Médio do Instituto Federal da Paraíba - Campus Esperança, a mergulhar em duas realidades diferentes, mas que se conectam pela mesma essência de aprendizado e transformação no Sítio Furnas, localizado em Montadas-PB, e no Sítio Benefício, em Esperança-PB. Essa disciplina tem como objetivo formar cidadãos com saberes técnicos-profissionais na área, integrando-os aos conhecimentos de ensino médio. Esse primeiro momento foi fundamental, pois nos permitiu observar, de forma prática, como as tecnologias sociais estavam inseridas no cotidiano das residências visitadas.

Durante esse percurso, tivemos contato direto com as famílias residentes e com as tecnologias presentes em cada local. No Sítio Furnas, observamos o biodigestor, o sistema de reúso de água e o projeto “quintais produtivos”¹, voltado para a criação de galinhas. Já no Sítio Benefício, conhecemos o fogão ecológico² e obtivemos informações sobre a Associação

¹ São áreas de terras individuais ou coletivas, de estabelecimentos particulares ou com reconhecimento de posse ou uso coletivo, de extensão variada, utilizadas para fins agrícolas e de produção sustentável. Disponível em: <https://www.gov.br/mda/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/quintais-produtivos> Acesso em: 03 nov. 2025.

²A tecnologia empregada pela Secretaria do Desenvolvimento Agrário (SDA) por meio do Projeto Paulo Freire (PPF) utiliza uma câmara de combustão que possibilita um processo de queima da lenha com o mínimo de fumaça, expelida por meio de uma chaminé, reduzindo assim o consumo de lenha e, consequentemente a emissão de fumaça. Disponível em: <https://www.sda.ce.gov.br/wp->

de Desenvolvimento Comunitário de Benefício¹ e seus projetos. Esse conhecimento inicial foi essencial para nosso aprendizado, pois as informações obtidas em campo complementam a teoria estudada em sala de aula, unindo o conhecimento técnico às realidades sociais e econômicas encontradas nas comunidades rurais. Enriquecendo tanto o nosso aprendizado quanto a compreensão do papel das tecnologias no fortalecimento da agricultura familiar.

A partir dessa experiência, o tema que orientou os alunos da turma do 3º ano 2025 do curso de Sistemas de Energia Renovável, no Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), foi intitulado “Tecnologias Implantadas em Propriedades de Pequenos Agricultores”. Esse questionamento despertou em nós o interesse em conhecer de perto as experiências vividas por quem utiliza essas inovações. Por isso, escolhemos a História Oral como metodologia principal, buscando conhecer essas realidades por meio das vozes dos próprios agricultores. Mediante isto, elaboramos um roteiro de entrevistas e nos direcionamos ao campo com o propósito de ouvir, observar, aprender e analisar como são as vivências das pessoas com o uso dessas tecnologias.

No Sítio Furnas, fomos recebidas por Vinicius e sua mãe Rosileide, pequenos agricultores que residem na comunidade. Eles nos acolheram com simplicidade e generosidade, compartilhando um pouco de suas vivências e mostrando como as tecnologias transformaram o cotidiano da família. Foi possível perceber, de perto, como o biodigestor, o sistema de reúso de água e o projeto dos quintais produtivos contribuíram para tornar o dia a dia mais prático, sustentável e econômico. Já no Sítio Benefício, entrevistamos Marilene e Maria Lúcia, integrantes da associação local, e por meio delas, conhecemos histórias marcadas por esforço, união e superação.

As conversas nos fizeram compreender não apenas as melhorias trazidas pelas tecnologias, mas também questões sociais mais amplas, como as desigualdades de gênero e as novas oportunidades que a participação na associação proporcionou às mulheres da comunidade do Sítio Benefício. Essas vivências mostraram que as tecnologias sociais vão

content/uploads/sites/60/2018/10/FLOR%C3%94_TEC-SOCIAIS_FOG%C3%83O-ECOL%C3%93GICO.pdf Acesso em: 03 nov. 2025.

¹ Sua atividade principal é de Atividades de associações de defesa de direitos sociais, de acordo com o código CNAE S-9430-8/00. Disponível em: <https://www.econodata.com.br/consulta-empresa/24513459000157-associacao-de-desenvolvimento-comunitario-de-beneficio#informacoes-cadastrais-section> Acesso em: 03 nov. 2025.

muito além do aspecto técnico, elas transformam vidas, despertam o sentimento de pertencimento e valorizam o trabalho no campo.

Durante o desenvolvimento das entrevistas, buscamos compreender não apenas os impactos econômicos e sociais das tecnologias implantadas, mas também as histórias de vida dos participantes, que revelaram aspectos marcantes sobre suas trajetórias no meio rural. As memórias compartilhadas pelos entrevistados nos permitiram conhecer melhor o contexto no qual essas tecnologias foram inseridas e perceber como o passado, a educação e as experiências familiares influenciam diretamente na forma como cada um lida com as inovações em suas propriedades.

Ao ouvirmos os relatos sobre a infância dos entrevistados, foi possível perceber como as experiências vividas no meio rural moldaram não apenas suas histórias pessoais, mas também suas relações com a terra e com o trabalho agrícola. As lembranças compartilhadas sobre as infâncias trazem à tona aspectos sociais marcados pelo pertencimento ao espaço rural, pela convivência familiar e pelas tradições passadas entre gerações. O relato “Minha infância sempre foi aqui na roça junto com meus pais nessa casa que a gente mora, eu vim morar aqui quando eu tinha um mês de idade” (Vinícios, 2025 p. 3), evidencia um forte vínculo com o território e a comunidade. Como visto no relato de Lúcia sobre sua infância, ela expressa nostalgia de uma infância simples, mas repleta de significados, onde as brincadeiras com os primos e amigos substituíam os brinquedos modernos: “Mesmo que seja sofrido, a gente não tinha as coisas que hoje nossos filhos têm, mas era muito bom (...) Era roda de pneu, de pique-toca, de baleada, de bambolê, era muito divertido” (Lúcia, 2025 p. 3). Essas memórias refletem a riqueza afetiva do ambiente rural, onde as relações humanas e o contato com a natureza marcaram o modo de viver.

Em contraste, o relato de Marilene revela uma realidade distinta, onde a infância foi atravessada pelas responsabilidades do trabalho desde cedo: “na realidade, assim, eu digo que não tive infância. Porque, a gente já começou no ramo da agricultura desde cedo (...) a gente sempre trabalhou com os pais da gente e a questão da parte de infância sempre foi ali, com os pais da gente na agricultura e no roçado” (Marilene, 2025 p. 3). Esse depoimento mostra como, para muitas famílias, o trabalho no campo era uma necessidade econômica, naturalizada como parte da formação das crianças. Assim, as falas expressam diferentes perspectivas sobre a infância no meio rural: de um lado, o afeto e o pertencimento; de outro, a dureza das condições de vida e a inserção precoce no trabalho agrícola.

Na continuidade das entrevistas, as falas sobre educação revelaram mudanças significativas nas oportunidades e percepções sobre o aprendizado no meio rural. Enquanto gerações mais antigas, como relatado por Rozileide, vivenciaram limitações marcadas pela autoridade paterna e pela pouca valorização dos estudos, “só estudei até a 4ª série (...) pai não deixava nem estudar”(Rozileide, 2025 p. 3), outras gerações mais recentes demonstram um avanço notável, tanto na continuidade da formação quanto no acesso a níveis mais elevados de ensino. Essa transformação é evidenciada por Vinícios, que completou o ensino médio e afirmou estar “finalizando uma graduação” (Vinícios, 2025 p. 3), mostrando que a educação passou a ocupar um lugar de destaque na vida das famílias agricultoras, sendo vista como um meio de progresso e realização pessoal.

As experiências relatadas por Vinícios reforçam ainda mais a importância da educação no campo como instrumento de transformação social e econômica. Sua fala evidencia que, desde a infância, a escola rural desempenhava um papel além da alfabetização tradicional, integrando o ensino às práticas produtivas da agricultura familiar. Ele destaca que “por ser uma escola do campo, a gente tinha tanto a parte de alfabetização necessária, mas também estudava a respeito do campo (...) sempre em parceria com a AS-PTA¹ de Remígio” (Vinícios, 2025 p. 4), o que demonstra a presença de políticas públicas voltadas para o fortalecimento da produção sustentável. Essa abordagem educativa permitia que o conhecimento adquirido fosse imediatamente aplicado nas propriedades, como ele mesmo afirma: “o que a gente aprendia lá, sempre replicava nas nossas casas” (Vinícios, 2025 p. 4), revelando uma aprendizagem prática e transformadora, com impacto direto na economia familiar e na preservação ambiental. Além disso, ao mencionar que “toda comunidade participava” (Vinícios, 2025 p. 4), o entrevistado evidencia o caráter coletivo e social dessas iniciativas, que fortalecem o senso de cooperação e o vínculo entre educação e desenvolvimento local.

A fala de Marilene destaca o esforço cotidiano no passado para conciliar o estudo com o trabalho no campo: “quem estudava de manhã, trabalhava à tarde, e quem estudava à tarde, trabalhava de manhã (...) a gente tinha que ajudar os pais da gente, porque aquele tempo era um tempo difícil” (Marilene, 2025 p. 4). Essa realidade traduz a relação entre o aprendizado e as condições econômicas das famílias. O fato de essa mesma entrevistada hoje

¹ É uma associação de direito civil sem fins lucrativos que, desde 1983, atua para o fortalecimento da agricultura familiar e a promoção do desenvolvimento rural sustentável no Brasil. Disponível em: <https://aspta.org.br/quem-somos/> Acesso em: 03 nov. 2025.

cursar faculdade de Extensão Rural na modalidade EAD representa não apenas um avanço individual, mas também o reflexo de políticas de inclusão educacional.

Ao aprofundarmos as entrevistas, observamos como as tecnologias renováveis implantadas nas comunidades rurais não apenas melhoraram a qualidade de vida das famílias, mas também promoveram o desenvolvimento social e a ampliação do conhecimento coletivo. As falas dos entrevistados demonstram que essas iniciativas ultrapassam o âmbito técnico, fortalecendo a organização comunitária, o aprendizado mútuo e a autonomia dos agricultores e agricultoras.

Durante a entrevista com Maria Lúcia, moradora do Sítio Benefício, foi possível perceber o quanto a comunidade se transformou após a chegada das tecnologias. Ao ser questionada sobre quais são as tecnologias renováveis utilizadas no local, ela relatou: “O fogão, mini cisterna, temos o canteiro, temos reuso de água, temos o motor bomba, o canteiro sombreado, tela.” (Maria Lúcia, 2025 p. 6). Esse conjunto de práticas e equipamentos reflete o esforço coletivo para construir soluções sustentáveis, adaptadas à realidade do semiárido.

Sobre como o projeto chegou à comunidade Benefício, Maria Lúcia explicou que o processo envolveu um longo caminho de formação e organização: “A gente teve bastante oficinas, bastantes reuniões informativas. Pra fundir o primeiro fundo Rotativo com 10 pessoas eu só busquei informação com Dona Ritinha, e o sindicato”. “Quando o sindicato viu que a gente tava bem-organizado nessa parte, foi aonde eles trouxeram à AS-PTA pra cá, pra vir todas as tecnologias teve um processo de formação. Sempre a gente teve assessoria da AS-PTA.” (Maria Lúcia, 2025 p. 6). A fala demonstra que o conhecimento não chegou de forma isolada, mas foi construído de maneira participativa, por meio de oficinas, reuniões e parcerias com entidades de apoio, fortalecendo o papel educativo e coletivo do projeto.

Outro ponto relevante destacado pela entrevistada diz respeito à dinâmica da comunidade e à responsabilidade compartilhada entre os participantes: “De início a gente se reúne, quando a gente se reúne a gente fala todas as regras, compromisso né, tudo bem direitinho, que você tem que conversar, contribuir antes de você ser contemplado, porque no início a gente não tinha recurso”. “A gente passa todas essas informações, de sorteio. Agora a gente tem um carnê, que é a carteirinha pra todo mundo que serve até como comprovação de agricultor.” (Maria Lúcia, 2025 p. 6). Essa fala evidencia a existência de uma gestão democrática e participativa, em que o diálogo e a contribuição mútua são fundamentais para o funcionamento e continuidade das ações.

Ao ser questionada sobre a participação dos jovens e sua permanência no campo, Maria Lúcia destacou uma mudança significativa no olhar das novas gerações: “Agora depois a gente percebe muito isso. Tem uma menina aqui que é exemplo disso, ela começou com uma ovelha, e tudo o que ela precisa comprar vem da ovelha”. “Os jovens como eles não têm uma vida financeira, então vem projetos só de repasse porque fica melhor pra eles. Aqui faltava muito isso.” (Maria Lúcia, 2025 p. 7). O relato demonstra que as tecnologias e projetos implantados despertam nos jovens o interesse em permanecer e investir na própria comunidade, tornando o campo um espaço de oportunidades e sustentabilidade.

Sobre a autonomia das famílias, Maria Lúcia reforçou a importância da responsabilidade individual na manutenção das tecnologias: “Os fogões têm que ser cada pessoa que faça sua manutenção, porque se for a gente tendo que fazer, a gente não tem, tem que ser cada família que possa fazer o seu.” (Maria Lúcia, 2025 p. 8). Essa visão de autogestão revela o amadurecimento da comunidade e a valorização do conhecimento local como base para a continuidade das práticas sustentáveis.

Apesar dos avanços, a entrevistada também relatou as dificuldades enfrentadas na relação com os órgãos públicos e o apoio governamental: “A gente já recebeu visitas, intercâmbios dos Ministros do Governo Federal”, “mas vieram mais pra ver todo esse processo, e também por conta das ameaças das eólicas, veio pra gente contar como é aqui pra essas eólicas não chegarem.” (Maria Lúcia, 2025 p. 8). Ela acrescenta que, embora haja reconhecimento, ainda há limitações na execução de políticas: “O governo valoriza sim, só que esse governo que tá agora ele dá uma abertura muito grande, porque a cisterna veio através deles. Tá meio difícil agora, mas a gente ainda conseguiu a cisterna.” (Maria Lúcia, 2025 p. 8).

Mesmo diante dos desafios, o sentimento predominante é o de conquista coletiva. Maria Lúcia afirmou com orgulho: “Já inspiraram né, porque quando eu tava até grávida (...), eu fui pra outras comunidades falar o que era o fundo rotativo. Porque quando chegou aqui na comunidade da gente, explodiu pra todo mundo e todo mundo queria entrar.” (Maria Lúcia, 2025 p. 9). Sua fala mostra o efeito multiplicador da experiência, que inspirou outras localidades a adotarem práticas semelhantes. Ela conclui destacando a importância do protagonismo local: “A gente que começou, tinha em outras comunidades acredito, mais antigas, mas assim a questão de fogão, tudo do fundo foi aqui primeiro.” (Maria Lúcia, 2025 p. 9).

Da mesma forma, a entrevista com Vinícios, morador do Sítio Furnas, revelou um profundo envolvimento com as tecnologias implantadas e um conhecimento técnico sólido sobre o funcionamento delas. Ele relatou: “A gente tem o biodigestor, temos o bioágua que é a reutilização da água e os quintais produtivos.” (Vinícios, 2025 p. 8). Ao explicar o funcionamento do biodigestor, demonstrou domínio sobre o processo: “O biodigestor ele funciona nada mais que produção de gás, por meio das fezes do gado”. “Todo dia a gente coleta as fezes, mistura com água, tem a quantidade certa, 15Kg de fezes para 15L de água. dilui em quantidade igual, e ocorre a fermentação na caixa”. “Daí ela vira gás, e a gente utiliza na cozinha, para cozinhar as refeições. Desde janeiro que a gente não compra gás.” (Vinícios, 2025 p. 8).

Figura 1 - Biodigestor instalado em residência no Sítio Furnas, Montadas-PB.



Fonte: Autoria própria.

O entrevistado também descreveu o sistema de reúso da água, o bioágua, mostrando o impacto direto na economia doméstica e na convivência com o semiárido:

“O bioágua nada mais é do que toda água que a gente lava louça, toma um banho, lava roupa, vai para três fases da catação (...). Depois passa por três tanques, um de decantação, um de filtragem e um que sai água filtrada já. Aí desse que ficava filtrada é bombeado com uma bomba energia para uma caixa d’água que desce em gravidade para irrigação de capim e palma para o gado.” (Vinícios, 2025 p. 10).

Essa prática representa não apenas um uso eficiente dos recursos naturais, mas também uma alternativa essencial em períodos de seca, garantindo alimento para os animais e a continuidade da produção agrícola.

Figura 2 - Bioágua instalado em residência do Sítio Furnas, Montadas-PB.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3 - Bioágua instalado em residência do Sítio Furnas, Montadas-PB.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4 - Sistema de reuso de água para irrigação em residência no Sítio Furnas, Montadas-PB.



Fonte: Autoria própria.

Ao abordar os quintais produtivos, Vinícios destacou o caráter educativo e sustentável do projeto:

É patrocinado também pela Cáritas¹ e pelo Banco do Brasil. Eles patrocinam a construção, com o intuito de um melhoramento na produção na família. (...) Todo mês vem um visitador do projeto ver como está a manutenção, está tudo ok e a produção anotada na caderneta. (Vinícios, 2025 p. 10).

Sua fala demonstra o acompanhamento contínuo e o compromisso em manter o equilíbrio entre produção e sustentabilidade. Mesmo diante de dificuldades, como o adoecimento das galinhas, o entrevistado mostrou consciência e aprendizado diante dos desafios: “Teve que fazer consulta no veterinário com as galinhas e comprar um remédio (...). Foi feito oficinas, vai ser para ensinar outros métodos para não acontecer isso, mas infelizmente foi a questão climática e não o cuidado da galinha.” (Vinícios, 2025 p. 11).

¹ Trata-se de uma rede de pessoas organizadas em grupos, comunidades, paróquias, municípios e regiões que contribuem para a vivência da solidariedade, construção da cidadania e fortalecimento da democracia e da organização popular, visando a uma sociedade justa e solidária. Disponível em: <https://www.aspr.org.br/caritas/> Acesso em: 03 nov. 2025.

Figura 5 - Sistema de túnel de telas de galinhas em residência no Sítio Furnas, Montadas-PB.



Fonte: Autoria própria.

Figura 6 - Canteiro sombreado de galinhas em residência no Sítio Furnas, Montadas-PB.



Fonte: Autoria própria.

Ao darmos continuidade à análise dos dados coletados, observamos que os impactos econômicos e sustentáveis das tecnologias implantadas nas comunidades rurais de Furnas e Benefício foram amplamente percebidos pelos moradores. As falas de Vinícios e Maria Lúcia

revelam não apenas os benefícios financeiros diretos, mas também o fortalecimento da autonomia produtiva e a redução dos custos domésticos, fatores que reforçam a sustentabilidade a longo prazo.

Durante a entrevista com Maria Lúcia, ao perguntarmos sobre o aumento da renda familiar e coletiva, ela nos respondeu com entusiasmo: “Houve, porque tem pessoas que fazem sua horta em casa, aí já tem um lucro aqui na associação” (Maria Lúcia, 2025 p. 7). Essa fala demonstra como o uso das tecnologias, tem proporcionado novas formas de produção e geração de renda dentro da própria comunidade. Em seguida, ela destacou quais atividades econômicas foram mais beneficiadas:

Tem a menina que vende rosa do deserto, mas eu acho que mais em horta foi melhor, porque quando você tem o canteiro você já tem aquela economia dentro de casa, porque tanto serve para aquela família economizar, não ir pra rua comprar, como serve pra vender também (Maria Lúcia, 2025, p. 7).

Essas observações mostram como o projeto impactou positivamente a economia local, promovendo não apenas o lucro individual, mas também o fortalecimento do comércio interno e da solidariedade comunitária. A sustentabilidade aparece de forma prática, quando os moradores passam a produzir o próprio alimento e a reduzir gastos com produtos externos, criando um ciclo econômico mais autônomo e ecológico. Entretanto, Maria Lúcia também mencionou algumas dificuldades enfrentadas na implantação e manutenção das tecnologias: “Quando o fogão veio, a questão do tijolinho, tijolo de churrasqueira, às vezes a gente encontra, às vezes tá em falta”. “Questão do reuso de água veio um senhor, que já trabalha pra AS-PTA pra construir, porque muita gente não sabe como que faz. (...) A cisterna já é diferente, tem gente daqui que sabe fazer.” Mesmo diante dos desafios, ela ressaltou que a comunidade busca se adaptar e manter o funcionamento: “Faltar sempre falta. Ninguém deixa atrasar, tem mais pessoas pra entrar, a gente só evoluiu” (Maria Lúcia, 2025 p. 7).

A fala de Vinícios complementa e reforça essa perspectiva. Ao comentar sobre as manutenções, ele explicou: “Os projetos responsáveis, por exemplo, se quebrar algum encanamento, alguma coisa, o projeto responsável dá o encanamento. Mas a família tem formação para fazer a própria manutenção” (Vinícios, 2025 p. 13). Isso evidencia a preocupação com a autonomia dos moradores e a capacitação técnica como forma de garantir a sustentabilidade dos sistemas. Ele também contou que participou de uma formação sobre o manejo completo do biodigestor e do bioágua. Ele compartilha um cuidado com o

biodigestor: “Sempre tem que ficar atento, a cada três meses olhar o filtro dele se ainda tem água (...) Se tiver algum vazamento, tem que ficar de olho, porque o gás vai embora, aí você perde o seu trabalho” (Vinícios, 2025 p. 14).

O impacto econômico direto também ficou evidente quando Vinícios relatou a diferença que o biodigestor trouxe para a família: “A nossa maior dificuldade era quando acabava o gás, principalmente à noite ou então logo cedo. (...) Às vezes acabava bem na hora. E aí, fazer fogo de carvão na carreira. Aí a nossa reclamação era essa” (Vinícios, 2025 p. 16). Com a instalação da tecnologia, esse problema foi eliminado: “Desde janeiro que a gente não compra gás” (Vinícios, 2025 p. 8). Além da economia, ele destacou a melhora na qualidade de vida: “Antes, gastava muito gás e também a questão do carvão, que a gente usava muito. Tinha muita fumaça na casa, agora vemos mais uma melhoria” (Vinícios, 2025 p. 14).

Outro ponto importante mencionado por ele foi a contribuição das tecnologias para a produção agrícola mesmo em períodos de seca: “Esse projeto ajudou bastante nisso, porque hoje a gente produz de seca a inverno. A gente tem o capim garantido, tem a palma garantida, que antes não tinha” (Vinícios, 2025 p. 10). Isso mostra o impacto direto na segurança alimentar do gado e, conseqüentemente, na renda da família.

Por fim, Vinícios fez uma reflexão sobre a necessidade de ampliar o acesso a essas tecnologias: “O que eu gostaria que melhorasse era o acesso a mais pessoas. (...) Tem muita gente que cria muito gado e utiliza tanto gás e carvão. Então é um gasto muito alto para eles. (...) Acho que futuramente vai ser ampliado” (Vinícios, 2025 p. 17). Essa fala reflete um sentimento coletivo de valorização do projeto e o desejo de que mais famílias possam usufruir dos benefícios econômicos e ambientais das tecnologias renováveis.

A partir das entrevistas e observações realizadas durante o desenvolvimento do projeto integrador e do trabalho de conclusão de curso, foi possível compreender o quanto as tecnologias renováveis implantadas impactaram positivamente a vida das famílias e a dinâmica das comunidades rurais visitadas. Essas tecnologias como o biodigestor, o sistema Bioágua, os fogões ecológicos e as cisternas, não apenas transformaram o cotidiano das famílias, mas também contribuíram para a sustentabilidade ambiental, a autonomia econômica e o fortalecimento social dessas populações.

Ao longo das falas, percebeu-se que as mudanças foram muito além do aspecto técnico. Houve uma transformação profunda na forma como as pessoas passaram a enxergar o próprio papel dentro da comunidade. As mulheres, por exemplo, ganharam voz e

protagonismo, participando ativamente de reuniões, cursos e projetos, rompendo com antigos padrões de isolamento e dependência. Essa mudança, destacada por Maria Lúcia, mostra como a inserção de tecnologias sustentáveis pode também ser um instrumento de empoderamento social e de igualdade de gênero “Mudou muito, até tinha mulheres que viviam trancadas em casa, caladas, eu mesma que tive que começar a falar, já dei várias entrevistas sobre o fundo rotativo” (Maria Lúcia, 2025 p. 6).

Do ponto de vista econômico, as tecnologias trouxeram oportunidades reais de geração de renda e redução de custos. Com o uso do biodigestor, o gasto com gás e carvão diminuiu significativamente, além de reduzir a poluição dentro das casas. O reuso da água, por sua vez, garantiu produtividade mesmo em períodos de seca, fortalecendo a produção local e a segurança alimentar. Como relatado por Vinícios, a família passou a ter estabilidade na criação de animais e nas plantações, assegurando uma fonte contínua de sustento e renda.

Além disso, o conhecimento adquirido com as capacitações oferecidas pelos projetos permitiu que as famílias se tornassem mais independentes, capazes de realizar manutenções e compreender o funcionamento dos sistemas implantados. Isso reforça a sustentabilidade das ações, uma vez que o saber local é fortalecido e a comunidade se torna mais autônoma para enfrentar desafios futuros.

Dessa forma, pode-se concluir que as tecnologias renováveis implantadas representaram muito mais do que simples inovações técnicas: elas significaram um avanço social, econômico e ambiental. As experiências relatadas evidenciam que iniciativas como essa são fundamentais para o desenvolvimento sustentável do meio rural, promovendo não apenas melhorias materiais, mas também dignidade, união comunitária e consciência ecológica.

3. ANALISANDO O CONTEXTO DA AGRICULTURA FAMILIAR COM TECNOLOGIA RENOVÁVEL

Através das visitas técnicas feitas durante o processo de visitação às comunidades escolhidas para a realização desse trabalho e das entrevistas obtidas, das transcrições e das respectivas análises, podemos notar a imprescindível necessidade de propagarmos as mudanças positivas alcançadas através da inserção de soluções sociais inovadoras.

Nas comunidades em que realizamos as pesquisas, ficou evidente o papel crucial que as tecnologias renováveis têm no aprimoramento da organização do trabalho familiar, na gestão dos recursos naturais e na percepção de qualidade de vida da comunidade usuária.

Esse fato pode ser observado na entrevista concedida por Rosileide (2025), quando ela diz que anteriormente à aplicação do biodigestor, as etapas de sua rotina, como o processo de cozinhar o almoço, eram mais demorados, decorrente da necessidade de preparar o fogo para poder começar a feitura dos alimentos. Ela relata que, após a instalação do biodigestor, sua qualidade de vida e bem-estar obtiveram uma elevação significativa. Sem a necessidade de fazer a lenha queimar, ela começa o preparo do almoço com a hora mais avançada, o que consequentemente facilitou o seu cotidiano nas tarefas diárias. Esses resultados refletem a importância da adoção de soluções tecnológicas adaptadas ao contexto local, capazes de responder a necessidades específicas e de promover maior autonomia produtiva.

Congruente a isso, percebe-se que as tecnologias sociais implantadas nas comunidades foram contribuintes na transformação da realidade das mulheres, promovendo maior autonomia, participação e confiança nelas mesmas. Como relata Maria Lúcia - diretora da Associação de Desenvolvimento Comunitário de Benefício -, essas iniciativas possibilitaram a mudança nos padrões de gênero da comunidade, com muitas mulheres passando do seu papel restrito ao ambiente doméstico e passando a atuar ativamente em atividades coletivas e de liderança. Projetos como o fundo rotativo e os espaços de diálogo organizados pelos(as) representantes, criaram a oportunidade para que elas expressassem suas ideias, sentimentos e pensamentos, bem como fizeram com que elas partilhassem suas experiências obtidas com o projeto e atuassem como membros fundamentais no desenvolvimento da comunidade.

Já os malefícios das tecnologias analisadas na rotina dessas pessoas se apresenta consideravelmente nula, devido a sua dimensão ser menor, proporcionando uma margem reduzida de prejuízos quando comparada à implantação de uma grande quantidade de uma dessas tecnologias.

À exemplo disto, temos os parques eólicos¹ que pela sua magnitude, provocam impactos que se tornam mais notórios e agressivos. Eles são causados tanto no meio ambiente

¹ Um parque eólico é um local designado à geração de energia eólica. Ele consiste de um grupo de geradores eólicos com dimensões que variam de 600 kW a 5 MW, dispostos ao longo do território para aproveitar ao máximo os recursos eólicos do local. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/energia-eolica/parque-eolico> Acesso em 30 out. 2025.

como no espaço em que são instalados, impactando ainda a saúde e bem-estar dos habitantes da região por meio dos ruídos e da produção agrícola afetada, tornando os benefícios e finalidades à que são aplicadas imperceptíveis.

De modo geral, os resultados apontam que as tecnologias renováveis e sociais analisadas promovem benefícios significativos na área socioeconômica, sendo vistas pelos próprios(as) agricultores(as) como alternativas viáveis e adequadas às suas necessidades. Dessa forma, os resultados observados nesta pesquisa servem como referência para futuras iniciativas que visem ampliar o acesso a essas tecnologias, deixando evidente a fácil adaptação às realidades locais e a promoção à igualdade de gênero no campo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise das falas dos entrevistados, concluiu-se que a implantação de inovações tecnológicas em propriedades pequenas reforça a importância dos investimentos na agricultura familiar, uma vez que proporcionam melhorias significativas na rotina dos moradores e, conseqüentemente, em sua produção.

Foi visto que, os sistemas aplicados, como o biodigestor, o fogão ecológico e o sistema de reúso de água, além de proporcionarem ganhos produtivos, também contribuíram para reduzir o esforço físico e ampliar a eficiência das atividades cotidianas. Esses fatos deixam explícito a relevância das tecnologias sustentáveis como instrumentos de desenvolvimento rural e de promoção da qualidade de vida no campo.

Entretanto, os resultados também apontam a necessidade de ampliar o acesso a essas tecnologias por meio de políticas públicas que incentivem os projetos de pesquisas dessa área para que ofereçam suporte técnico e assegurem condições para sua manutenção. Contudo, isso depende da criação de redes de apoio e do investimento em formação técnica que permitam a consolidação dessas práticas a longo prazo.

Conclui-se, portanto, que as tecnologias sociais e renováveis representam um caminho viável e promissor para o fortalecimento da agricultura familiar e para a construção de comunidades rurais mais autônomas e sustentáveis.

FONTES

BATISTA, Marilene. Marilene Guedes Batista: depoimento [Setembro 2025]. Entrevistadores: Karolina Rose Souza Ferreira; Raquel da Silva Guedes; Yasmim Sophia Costa da Rocha.

Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2013. Entrevista concedida ao Projeto Memória da Ciência e Tecnologia de Campina Grande.

PEREIRA, Maria. Maria Lúcia da Silva Andrade Pereira: depoimento [Setembro 2025]. Entrevistadores: Karolina Rose Souza Ferreira; Raquel da Silva Guedes; Yasmim Sophia Costa da Rocha. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2013. Entrevista concedida ao Projeto Memória da Ciência e Tecnologia de Campina Grande.

RODRIGUES, Vinícios. Vinícios de Souza Rodrigues: depoimento [Agosto 2025]. Entrevistadores: Karolina Rose Souza Ferreira; Raquel da Silva Guedes; Yasmim Sophia Costa da Rocha. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2013. Entrevista concedida ao Projeto Memória da Ciência e Tecnologia de Campina Grande.

RODRIGUES, Rosileide. Rosileide Souza Silva Rodrigues: depoimento [Agosto 2025]. Entrevistadores: Karolina Rose Souza Ferreira; Raquel da Silva Guedes; Yasmim Sophia Costa da Rocha. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2013. Entrevista concedida ao Projeto Memória da Ciência e Tecnologia de Campina Grande.

REFERÊNCIAS

BORGES, Francisco Fachine. Tecnologias sociais e energias renováveis na agricultura familiar: experiências do NDTS/IFPB e parceiros. **Revista Práxis: Saberes da Extensão**, João Pessoa, v. 5, n. 10, p. 112-119, set./dez. 2017. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/praxis/article/view/1719/758> Acesso em: 16 out. 2025.

CARVALHO, E. da S.; LAGO, S. M. S. Tecnologia social no contexto da agricultura familiar: análise da reaplicação no território Cantuquiriguaçu - Paraná. **Extensão Rural**, [S. l.], v.27, n.3, p. 84-105, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/extensaorural/article/view/38505> Acesso em: 16 out. 2025.

JARDIM, Fabiana Augusta Alves; OTERO, Martina Rillo. **Caderno de debate: Tecnologia Social no Brasil**. São Paulo. DOU, 2003. p. 26.

MINAYO, Maria Cecília de Souza. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 18. ed. Petrópolis: Vozes, 2001.

SELVA, Gracie Verde; ASSAD, Luís Tadeu; SÚAREZ, María Bonet; BRAKARZ, Barbara Inovação e sustentabilidade na agricultura familiar: Prêmio Rural Sustentável. Washington, D.C.: BID, 2019. Disponível em: <https://scispace.com/pdf/agroecologia-producao-e-sustentabilidade-em-pesquisa-volume-id5yooll.pdf> Acesso em: 15 out. 2025.

XAVIER, Antônio Roberto; MUNIZ, Karla Renata de Aguiar; SANTANA, José Rogério; CARNEIRO, Daniel Luis Madeira. História oral: abordagem teórico-metodológica, conceitual e contextual. **Práticas Educativas, Memórias e Oralidades - Rev. Pemo**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 1-16, 2020. Disponível em: <https://revistas.uece.br/index.php/revpemo/article/view/3802> Acesso em: 16 out. 2025.

CAPÍTULO VI

ABORDAGENS DE QUÍMICA VERDE NA INDÚSTRIA FARMACÊUTICA: PRINCÍPIOS, DESAFIOS E PERSPECTIVAS

GREEN CHEMISTRY APPROACHES IN THE PHARMACEUTICAL INDUSTRY: PRINCIPLES, CHALLENGES, AND PERSPECTIVES

DOI: 10.51859/ampla.mas5450-6

Francielita Bidô de Souza ¹

Lívia Araújo Santos ¹

Maria Rafaela Ferreira Lino de Jesus ¹

Yasmin Oliveira Barbosa ¹

Yasmin Dantas Veríssimo ¹

Welma Thaise Silva Vilar ²

Cristiane Miranda Furtado ²

Gessenildo Pereira Rodrigues ²

Antonio Carlos Vital Júnior ²

¹ Graduanda em Farmácia, Faculdade Rebouças de Campina Grande (FRCG), Campina Grande, CEP: 58407-368, Paraíba, Brasil.

² Professor/Orientador do curso de Farmácia da Faculdade Rebouças de Campina Grande (FRCG), Campina Grande, CEP: 58407-368, Paraíba, Brasil.

RESUMO

A Química Verde surgiu como uma abordagem essencial para a promoção de práticas sustentáveis na indústria farmacêutica, reduzindo a geração de resíduos e o uso de substâncias tóxicas. Além disso, essa vertente busca a criação de produtos e processos químicos que sejam ambientalmente mais seguros, economicamente viáveis e socialmente responsáveis. O objetivo do estudo foi analisar a forma que se utiliza a química verde nos processos industriais de produtos da área farmacêutica, a fim de apresentar uma boa utilização, apresentando seus princípios, desafios e perspectivas a longo prazo. O presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo e descritivo sobre os princípios, desafios e perspectivas da Química Verde aplicados ao setor farmacêutico, sendo analisados 25 artigos, dos quais 15 atenderam aos critérios de inclusão, publicados entre 1998 a setembro de 2025, obtidos nas bases SciELO, LILACS e PubMed. Os resultados indicaram que, apesar das barreiras regulatórias e dos altos custos de implementação, a Química Verde oferece soluções promissoras para minimizar os impactos ambientais da produção de insumos farmacêuticos ativos (IFAs), além de promover a inovação tecnológica e a sustentabilidade

industrial. Destaca-se também sua contribuição para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 3 e 12, relacionados à saúde, bem-estar e consumo responsável. Portanto, a adoção dos princípios da Química Verde na indústria farmacêutica é fundamental para o avanço científico e ambiental, exigindo, contudo, comprometimento institucional, investimento em pesquisa e adequação às normas regulatórias vigentes.

Palavras-chave: impactos. Desenvolvimento sustentável. Medicamentos. Resíduos. bem-estar.

ABSTRACT

Green Chemistry has emerged as an essential approach to promoting sustainable practices in the pharmaceutical industry, reducing waste generation and the use of toxic substances. In addition, this approach seeks to create chemical products and processes that are more environmentally safe, economically viable, and socially responsible. The objective of this study was to analyze how green chemistry is used in industrial processes for pharmaceutical products, in order to present its proper use, principles, challenges, and



long-term prospects. This study presents a qualitative and descriptive literature review on the principles, challenges, and perspectives of Green Chemistry applied to the pharmaceutical sector, analyzing 25 articles, of which 10 met the inclusion criteria, published between 2013 and September 2025, obtained from the SciELO, LILACS, and PubMed databases. The results indicated that, despite regulatory barriers and high implementation costs, Green Chemistry offers promising solutions to minimize the environmental impacts of the production of active pharmaceutical ingredients (APIs), in addition to promoting technological innovation and industrial

sustainability. Its contribution to the fulfillment of the Sustainable Development Goals (SDGs), especially SDGs 3 and 12, related to health, well-being, and responsible consumption, is also noteworthy. Therefore, the adoption of Green Chemistry principles in the pharmaceutical industry is fundamental for scientific and environmental advancement, requiring, however, institutional commitment, investment in research, and compliance with current regulatory standards.

Keywords: Impacts. Sustainable Development. Medicines. Waste. Well-being.

1. INTRODUÇÃO

Para que a química contribua efetivamente para o desenvolvimento de um mundo mais sustentável, Zuin e Kümmerer (2021) afirmam que é essencial que os conceitos químicos sejam ensinados em um contexto socioeconômico e ecológico mais amplo. No entanto, a química tem uma grande contribuição no desenvolvimento científico, principalmente na área farmacêutica, e partir disso, surgiu a química verde, com o intuito de conciliar a conservação dos recursos naturais com as demandas humanas (Ribeiro *et al.*, 2022).

Neste sentido a demanda crescente dos profissionais com conhecimento científico, a química verde e sustentável oferece uma visão mais abrangente, tendo em vista a conscientização do assunto no seu respectivo uso de materiais e métodos ecologicamente corretos (Zuin *et al.*, 2021). No campo pedagógico, Chen *et al.*, concluíram que o ensino da química verde fomenta a consciência ambiental, de forma interdisciplinar, em direção ao desenvolvimento de habilidades que promovem uma filosofia de ensino para a sustentabilidade. A Química Verde configura-se como uma área multidisciplinar dedicada ao desenvolvimento e à aplicação de produtos e processos químicos que priorizam a redução ou a eliminação do uso e da geração de substâncias nocivas ao meio ambiente e à saúde humana (Silva Júnior *et al.*, 2022).

O processo industrial farmacêutico, trata-se de um setor de promoção em saúde, porém os danos ambientais causados decorrente dos processos químicos, tem impactos significativos e coletivos na saúde da população atual e futura, o que traz uma preocupação ainda maior em tentar minimizar os impactos gerados ao meio ambiente por meio da produção (Tonini *et al.*, 2024). Nesse contexto, a química verde se destaca pela sua iniciativa

em priorizar, adotar e promover métodos capazes de minimizar a geração de substâncias tóxicas geradas através dos processos químicos, que causam impactos ao meio ambiente (Popi *et al.*, 2020).

Embora a aplicação dos princípios da Química Verde na fabricação de insumos farmacêuticos ativos (IFAs) possa parecer, a princípio, bastante óbvia e vantajosa, ela implica o desenvolvimento de novos processos orgânicos e metodologias sintéticas, o que pode representar uma barreira regulatória inicial (Brasil, 2016). Isso ocorre porque eventuais alterações no processo de produção de IFAs utilizados na produção de medicamentos que já possuem registro na respectiva agência reguladora, no caso do Brasil - a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), geram impacto regulatório para as indústrias farmoquímica e farmacêutica, requerendo a adequação e a revisão dos documentos necessários para obtenção da nova autorização junto à agência relativa ao emprego desse IFA na fabricação do medicamento acabado (Santos *et al.*, 2023).

Além disso, cabe destacar que, mesmo que um novo processo “verde” seja economicamente favorável quando diretamente comparado ao processo sintético original, essa comparação nem sempre reflete na adoção imediata deste novo processo pela indústria farmoquímica, uma vez que é necessário significativo aporte financeiro para viabilizar as adaptações estruturais requeridas na implementação do novo método, além do desenvolvimento das técnicas analíticas de controle e garantia da qualidade, e da submissão dos documentos suplementares para aprovação do novo processo de fabricação (Roschangar *et al.*, 2015). Partindo dessa questão, o presente trabalho tem o objetivo de analisar a forma de utilização da química verde nos processos industriais de produtos do setor farmacêutico, a fim de apresentar a boa utilização, apresentamos os princípios, desafios e perspectivas futuras.

2. METODOLOGIA

O presente estudo se caracteriza como uma pesquisa bibliográfica de caráter qualitativo, descritivo e de natureza básica. O estudo foi realizado com base em livros didáticos, artigos científicos e dissertações, que traziam a abordagem da temática da química verde, indústria farmacêutica e sustentabilidade. A coleta dos dados foi baseada em estudos publicados entre os anos de 1998 a setembro de 2025, onde foram analisados em torno de 25

artigos, sendo selecionados apenas 12 estudos a partir de base de dados como, LILACS, SciELO e PUBMED, onde os critérios de inclusão consideraram publicações dos anos de 2013 a 2025, disponíveis em inglês e português, que apresentavam relações diretas com a temática do presente artigo, sendo ela a aplicação da química verde em processos industriais farmacêuticos e a forma correta de descartes dos resíduos produzidos.

Logo, aqueles artigos que não se enquadraram nos critérios salientados e estavam fora do eixo temático foram excluídos. Ademais, todos os dados coletados nesta pesquisa foram sintetizados de maneira sistemática e as principais informações sobre os princípios e abordagens de química verde na indústria farmacêutica, visando um olhar crítico sobre seus desafios e perspectivas futuras foram devidamente esclarecidas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A indústria de produtos farmacêuticos revolucionou o modo de vida e expectativas de toda a população, nesse contexto, essa mudança trouxe consigo crescente utilização de processos químicos complexos, fazendo com que obtenha uma maior geração de resíduos, causando assim, uma realidade insustentável, quando se fala do meio ambiente (Tonini *et al.*, 2024).

De acordo com a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), considera-se produto farmacêutico qualquer substância ou formulação produzida tecnicamente, com finalidade prevenir, tratar, aliviar sintomas ou auxiliar no diagnóstico de enfermidades, que respectivamente essas preparações, que podem ser sólidas ou líquidas e contêm um princípio ativo, ao serem descartadas, tornam-se resíduos (Nascimento *et al.*, 2022).

Ao final de todo processo industrial, é necessário que ocorra um descarte correto dos resíduos e tratamento adequado, onde inicialmente ocorre o tratamento dos resíduos, que posteriormente são reciclados, e por fim os que não tem mais destino, vão para o processo de incineração (Castro e Cruz, 2024).

A química ocupa um papel essencial no desenvolvimento da humanidade, principalmente em soluções no âmbito da ciência farmacêutica (Ferreira, 2021). Dessa forma, ela está ligada diretamente a física e a biologia, fornecendo conhecimentos de propriedades físicas da matéria e dos materiais sobre os seres vivos (Milagre, 2023). A Química, para um mundo sustentável, requer, além de químicos altamente qualificados, profissionais da educação que promovam uma alfabetização em Química Verde nos diferentes níveis de

ensino (Andrade *et al.*, 2023). A tabela 1 apresenta um resumo dos principais achados sobre a execução da química verde em diferentes campos de pesquisa.

Tabela 1: Principais resultados e discussões sobre a aplicação da química verde

Autor(es) / Ano	Foco do Estudo	Principais Resultados	Discussão / Contribuição para o Tema
BARBOSA (2024) / TONINI, LOPES & BARBOSA (2024)	Química verde aplicada na produção farmacêutica	Apresentam métodos de síntese com redução do uso de solventes e reagentes tóxicos na produção de IFAs	Contribuem para o avanço da indústria farmacêutica sustentável, apresentando inovação tecnológica e responsabilidade ambiental.
ANDRADE & ZUIN (2023)	Ciência e ensino da Química Verde	Destacam a importância de integrar ciência, ética e meio ambiente na formação de profissionais químicos	Alfabetização científica desenvolve consciência ambiental e pensamento crítico.
DA SILVA et al. (2023)	Uso de enzimas como biocatalisadores farmacêuticos	Apresentam o papel das enzimas como catalisadores naturais, eficientes e menos poluentes	A biocatálise é destacada como alternativa sustentável; reforça os princípios da Química Verde em processos farmacêuticos.
MILAGRE (2021)	Estratégias sustentáveis em biocatálise	Defende o uso de biotecnologia e biocatalisadores como alternativas mais sustentáveis aos processos convencionais	Evidencia que a biocatálise reduz custos e impactos ambientais, promovendo sustentabilidade industrial.
SILVA JÚNIOR, JESUS & GIROTTI JÚNIOR (2022)	Relação entre Química Verde e a Tabela Periódica de Anastas & Zimmerman	Traduzem e contextualizam a Tabela da Química Verde, relacionando-a aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)	Mostram a articulação entre os princípios da Química Verde e as metas da Agenda 2030, destacando ciência e sustentabilidade global.
RIBEIRO et al. (2022)	Educação ambiental e agricultura sustentável no ensino de Química	Discutem práticas pedagógicas que aproximam química, meio ambiente e agricultura sustentável	Destacam o papel da educação científica no desenvolvimento da consciência ecológica.
ZUIN et al. (2021)	Ensino de Química Verde e Sustentável	Apresentam estratégias pedagógicas inovadoras para o ensino da Química Verde	Mostram que o ensino de Química Verde é essencial para formar cidadãos críticos e conscientes sobre sustentabilidade.

Autor(es) / Ano	Foco do Estudo	Principais Resultados	Discussão / Contribuição para o Tema
MELO (2021)	Implementação da Química Verde no setor industrial	Relata práticas de gestão ambiental e inovação para reduzir resíduos industriais	Evidencia a necessidade de políticas públicas e incentivos para adoção da Química Verde na indústria.
MUNDO (2016)	Agenda 2030 e Desenvolvimento Sustentável	Apresenta os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) como metas globais integradas	Relaciona os ODS com práticas sustentáveis, servindo de base para políticas ambientais globais.
BRASIL – ANVISA (2016)	Regulação e controle de processos químicos e sanitários	Estabelece normas de segurança e controle ambiental na manipulação de substâncias químicas	Fundamenta juridicamente a aplicação segura dos princípios da Química Verde nas indústrias e laboratórios.
ANASTAS & WARNER (1998)	Formulação dos 12 Princípios da Química Verde	Apresentam diretrizes que estruturam a prevenção da poluição e o uso eficiente de recursos químicos	Servem como base teórica e prática de todos os estudos posteriores sobre sustentabilidade e inovação química.

Fonte: Autoria Própria (2025)

Dessa forma, a química verde se destaca pelo sua iniciativa inicialmente por priorizar, adotar e promover métodos capazes de minimizar a geração de substâncias tóxicas gerados através dos processos químicos, que causam impactos ao meio ambiente (Tonini *et al.*, 2024). Nesse contexto, para a produção de substâncias é necessário a utilização de reagentes, solventes que contêm níveis de toxicidades e quando há uma grande produção podem causar danos ao meio ambiente e aos indivíduos que entraram posteriormente em contato com as mesmas, seja no meio de produção ou na utilização (Milagre, 2023).

Inúmeras indústrias visam otimizar seus lucros, pois, a utilização de compostos com menor toxicidade, a utilização de matérias-primas renováveis, desenvolvimento de produtos biodegradáveis e a diminuição do desenvolvimento de derivados de reações, pode necessitar investimentos de grande custo diferente dos métodos convencionais de produção (Melo *et al.*, 2021).

Na indústria farmacêutica a utilização de enzimas já vem sendo usada desde muitos anos, já que elas são responsáveis por acelerar as reações, sem que ocorra alterações químicas, sendo chamadas de catalizadores (Rocha, 2023). Dessa forma, quando interligadas a indústria farmacêutica, as enzimas oferecem diversas vantagens, como a redução no

consumo de energia e diminuição de perdas, sendo assim consideradas catalisadores biológicos entrando assim em acordo com a química verde (Da Silva, 2023).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do que foi abordado, é possível concluir que a química verde tem o papel fundamental na construção de práticas sustentáveis, tanto na indústria como no âmbito educacional. Ao compreender a origem e os demais princípios, tem o papel de contribuir não apenas para minimização de impactos ambientais, mas para a promoção e bem-estar da saúde.

Portanto, o ensino da química verde demonstra os impactos de transformações efetivas conforme o alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 onde reforça a importância para garantir práticas produtivas mais seguras, eficientes e sustentáveis. Dessa forma, presente estudo tem a iniciativa diante de desafios regulatórios promover na indústria farmacêutica oportunidades que estimulem a sustentabilidade e a saúde pública, por meio do uso adequado dos processos e do correto manejo dos descartes. Diante disso, espera-se que novos estudos e pesquisas, que abordem a química verde ligada à sustentabilidade na produção e geração de resíduos em indústrias farmacêuticas, sejam apresentadas de forma clara e objetiva, abrangendo toda sua importância para a população futura.

REFERÊNCIAS

- ANASTAS, P.T. e WARNER, J.C. **Green Chemistry: Theory and Practice**. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- ANDRADE, Rosivânia da Silva; ZEIDLER, Vania G. Zuin. A química verde e sustentável: dos princípios à inserção na educação química. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 24, n. 1, p. 208-229, 2025.
- ANDRADE, R., & Zuin, V. (2023). Alfabetização Científica em Química Verde e Sustentável. **Educação Química En Punto De Vista**.
- BARBOSA, Maria Letícia. Aplicação da Química Verde na Produção de Insumos Farmacêuticos Ativos: Application of Green Chemistry in the Active Pharmaceutical Ingredients Manufacturing. **Revista Virtual de Química**, v. 16, n. 4, 2024.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. RESOLUÇÃO DA DIRETORIA COLEGIADA - RDC Nº 73,

DE 7 DE ABRIL DE 2016. Bras. Ministério da Saúde. Agência Nac. Vigilância Sanitária, 2016.

CASTRO, Alice Nascimento; CRUZ, Bruno Gabriel da Silva Marques. Gerenciamento de resíduos: **o processo de coleta, transporte e descarte de resíduos tóxicos**. 2024.

DA SILVA, Patrícia Batista et al. Enzimas: biocatalisadores essenciais na farmácia. **Fórum Rondoniense de Pesquisa** (ISSN: 2764-345X), v. 4, n. 9º, 2023.

FERREIRA, P. G.; FERREIRA, V. F. Farmácia, Química e a Qualidade de Vida. **Revista Virtual de Química**, v. 13, n. 2, 2021.

MELO, G. F. de. IMPLEMENTAÇÃO DA QUÍMICA VERDE PARA O SETOR INDUSTRIAL. **Revista Multidisciplinar De Educação E Meio Ambiente**, v.3, p.67, 2021.

MILAGRE, Cíntia Duarte de Freitas. **Biocatálise: a escolha por uma estratégia mais sustentável**. 2023.

MUNDO, Transformando Nosso. a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. **Recuperado em**, v. 15, p. 24, 2016.

NASCIMENTO, Emerson Alves da Silva; SANTOS, Guilherme Estevão dos; ANTUNES NETO, Joaquim Maria Ferreira. **Sistemas de Gestão Ambiental na Indústria Farmacêutica e Implicações em Responsabilidade Socioambiental**. Itapira: FATEC de Itapira “Ogari de Castro Pacheco”, v. 4, n. 2, p. 66-105, jul./dez. 2022.

POPI, Maria da Graça Carraro Busica; PINSKY, Vanessa Cuzziol; KULAY, Luiz Alexandre. O papel da química verde nas estratégias corporativas de inovação traçadas pelo setor químico brasileiro. **Brazilian Journal of Business**, v. 2, n. 3, p. 3042-3062, 2020.

RIBEIRO, Daniel das C. de A. et al. Sustentabilidade e Educação Ambiental no Ensino de Química: contribuições para a tomada de consciência sobre agricultura sustentável. **Química Nova na Escola**, v. 44, n. 2, 2022.

ROCHA, Thays Nogueira. **Desenvolvimento e otimização de biocatalisadores imobilizados por modificação química de suportes ativados: estudo da estabilidade e atividade enzimática**. 2023.

ROSHANGAR, F.; SHELDON, Roger A.; SENANAYAKE, Chris H. **Overcoming barriers to green chemistry in the pharmaceutical industry—the Green Aspiration Level™ concept**. **Green Chemistry**, v. 17, n. 2, p. 752-768, 2015.

SANTOS, Karine Pinto dos; PINHEIRO, Rebeca Shimada; MELO, Solange Gomes de. Importação de IFA (insumos farmacêuticos ativos): **legislação vigente e documentação necessária para esse processo**. 2023.

SILVA JÚNIOR, Carlos Alberto da; JESUS, Dosil Pereira de; GIROTTO JÚNIOR, Gildo. Química Verde e a Tabela Periódica de Anastas e Zimmerman: tradução e alinhamentos com o desenvolvimento sustentável. **Química Nova**, v. 45, p. 1010-1019, 2022.

TONINI, Marlon Daniel L.; DE OLIVEIRA LOPES, Raquel; DE CASTRO BARBOSA, Maria Letícia. Aplicação da Química Verde na Produção de Insumos Farmacêuticos Ativos: Application of Green Chemistry in the Active Pharmaceutical Ingredients Manufacturing. **Revista Virtual de Química**, v. 16, n. 4, 2024.

ZUIN, Vânia G. et al. Educação em química verde e em química sustentável: perspectivas para a sustentabilidade. **Green Chemistry**, v. 23, n. 4, p. 1594-1608, 2021.

CAPÍTULO VII

PICADAS QUE ALERTAM: PANORAMA EPIDEMIOLÓGICO DOS ACIDENTES PROVOCADOS POR ESCORPIÕES E ARANHAS NO PIAUÍ (2013–2023)

STINGS THAT WARN: AN EPIDEMIOLOGICAL OVERVIEW OF SCORPION AND SPIDER ACCIDENTS IN PIAUÍ, BRAZIL (2013–2023)

DOI: 10.51859/ampla.mas5450-7

Flaviane do Nascimento Silva ¹

Alessandro Medeiro Evaristo ²

Lucas Henrique Sousa Da Silva ³

Edson Lourenço da Silva ⁴

Tamaris Gimenez Pinheiro ⁵

¹ Licenciada em Ciências Biológicas. Universidade Federal do Piauí, *campus* Senador Helvídio Nunes de Barros – UFPI/CSHNB

² Licenciado em Educação do Campo, Ciências da Natureza. Universidade Federal do Piauí, *campus* Senador Helvídio Nunes de Barros – UFPI/CSHNB

³ Mestre em Biodiversidade e Conservação. Universidade Federal do Piauí, *campus* Amílcar Ferreira Sobral – UFPI/CAFS

⁴ Docente do Instituto Federal do Piauí, *campus* Picos – IFPI, *campus* Picos

⁵ Docente do Curso de Licenciatura em Ciências Biológicas. Universidade Federal do Piauí, *campus* Senador Helvídio Nunes de Barros – UFPI/CSHNB

RESUMO

As doenças tropicais negligenciadas, incluindo acidentes causados por aracnídeos peçonhentos, representam um sério problema de saúde pública, especialmente em regiões de baixa renda e áreas rurais. Este estudo caracterizou epidemiologicamente os acidentes provocados por escorpiões e aranhas na região geográfica imediata de Picos, Piauí, entre 2013 e 2023. A pesquisa foi de natureza quantitativa e utilizou a análise documental dos dados de acidentes registrados no Sistema de Informação de Agravos de Notificação (SINAN). Foram analisados 1.110 casos, sendo 1.022 causados por escorpiões e 88 por aranhas. Picos foi o município com maior número de acidentes, seguido por Monsenhor Hipólito e Pio IX. A incidência foi maior nos meses quentes e chuvosos, especialmente de outubro a janeiro. Os resultados mostraram que mulheres e trabalhadores rurais foram as principais vítimas, refletindo a exposição ocupacional e doméstica. A maioria dos acidentes resultou em dor e edema, com alguns casos apresentando sintomas sistêmicos graves. A centralização do atendimento médico em Picos contribui para o elevado número de registros nesse

município. As conclusões destacam a necessidade de políticas públicas que integrem ações educativas, preventivas e de melhoria da infraestrutura de saúde, visando à redução dos acidentes e à promoção de um ambiente seguro para a população.

Palavras-chave: Animais peçonhentos. Aracnídeos. Epidemiologia. SINAM.

ABSTRACT

Neglected tropical diseases, including accidents involving venomous arachnids, represent a significant public health problem, especially in low-income regions and rural areas. This study epidemiologically characterised accidents involving scorpions and spiders in the immediate geographic region of Picos, Piauí, between 2013 and 2023. The research was quantitative in nature and used documentary analysis of accident data recorded in the Notifiable Diseases Information System (SINAN). A total of 1,110 cases were analysed, of which 1,022 were caused by scorpions and 88 by spiders. Picos had the highest number of accidents, followed by Monsenhor Hipólito and Pio IX. The



incidence was higher during the hot and rainy months, especially from October to January. The results showed that women and rural workers were the primary victims, reflecting both occupational and domestic exposure. Most accidents resulted in pain and oedema, with some cases presenting severe systemic symptoms. The centralisation of medical care in Picos contributes to the high number of reported cases in this municipality. The

conclusions highlight the need for public policies that integrate educational, preventive, and healthcare infrastructure improvement measures to reduce accidents and promote a safer environment for the population.

Keywords: Arachnids. Epidemiology. SINAM. Venomous animals.

1. INTRODUÇÃO

As Doenças Tropicais Negligenciadas (DTN) afetam a vida de um bilhão de pessoas em todo o mundo e ameaçam a saúde de outros milhões (Organização Mundial de Saúde - OMS, 2012). Esse grupo de doenças atinge, principalmente, pessoas de baixa renda e politicamente marginalizadas, que vivem em áreas rurais e urbanas de países tropicais e subtropicais com limitação no acesso à saúde e serviços básicos, como abastecimento de água, saneamento, limpeza e gestão de resíduos, constituindo um grave obstáculo ao desenvolvimento socioeconômico e à qualidade de vida em todos os níveis (OMS, 2012).

Os acidentes causados por animais peçonhentos foram incluídos como DTNs pela OMS, em 2009, devido às características da população acometida: pobres inseridos no contexto rural (Sistema de Informação de Agravos de Notificação - SINAN, 2016). Esses acidentes afetam cerca de 4,5 a 5,4 milhões de pessoas no mundo, desses, entre 1,8 e 2,7 milhões adoecem e, entre 81.000 e 138.000 morrem todos os anos no mundo, causando também sequelas por deficiência física e psicológica (SINAN, 2016).

Animais peçonhentos são todos aqueles vertebrados ou invertebrados capazes de produzir substâncias tóxicas e injetá-los por meio de estruturas especializadas (Brasil, 2008). Apesar dessas toxinas serem utilizadas na captura de presas e defesa desses animais, elas representam riscos à saúde humana, principalmente para a parcela da população sem informação e sem acesso à serviço de saúde adequados. Os acidentes causados por animais peçonhentos no Brasil atingiram cerca de 1,3 milhão de notificações entre 2017 e 2021 (Brasil, 2022a).

Segundo a Associação Paulista de Medicina (2023), os escorpiões são os animais que mais geram registros de envenenamento no SINAN. Segundo essa mesma fonte, em 2021, esses aracnídeos foram responsáveis por 62,2% do total de notificações de acidentes por animais peçonhentos, o que correspondeu a 159.934 registros. Mais de 80% das notificações

de escorpionismo concentraram-se nas Regiões Nordeste e Sudeste, e neste mesmo ano em relação aos óbitos, foram notificados 133 (Associação Paulista de Medicina, 2023).

Quanto aos acidentes provocados por aranhas, entre os anos de 2009 e 2018, foram registrados 308.245 casos em todo o território brasileiro (Ceará, 2020). Destes, 128 evoluíram para óbitos (Ceará, 2020). Ainda de acordo com essa mesma fonte, houve um aumento nos últimos anos, tanto no número de casos, quanto na distribuição geográfica, evidenciando que os acidentes por aranhas correspondem ao terceiro maior número de ocorrências, representando quase 13% dos casos.

A frequência dos acidentes provocados por animais peçonhentos é determinada por diferentes fatores, incluindo o desequilíbrio ecológico provocado pela ação antrópica e a sazonalidade climática, marcada, principalmente por épocas do ano em que há aumento da temperatura e das chuvas, períodos em que esses animais se encontram mais ativos, tanto para a busca de alimento como para se reproduzir, aumentando assim a exposição e chance de contato com humanos (Lima; Soares; Pinho, 2016; Pires *et al.*, 2023).

Diante das informações apresentadas é evidente a importância de averiguações regional e local sobre os acidentes causados por aracnídeos peçonhentos a fim de gerar dados a respeito dos danos ocasionados por esses animais ao ser humano e a contribuição das ações antrópicas para esse cenário. Assim, este trabalho tem como objetivo realizar a caracterização epidemiológica dos acidentes provocados por escorpiões e aranhas na região geográfica imediata de Picos, estado do Piauí.

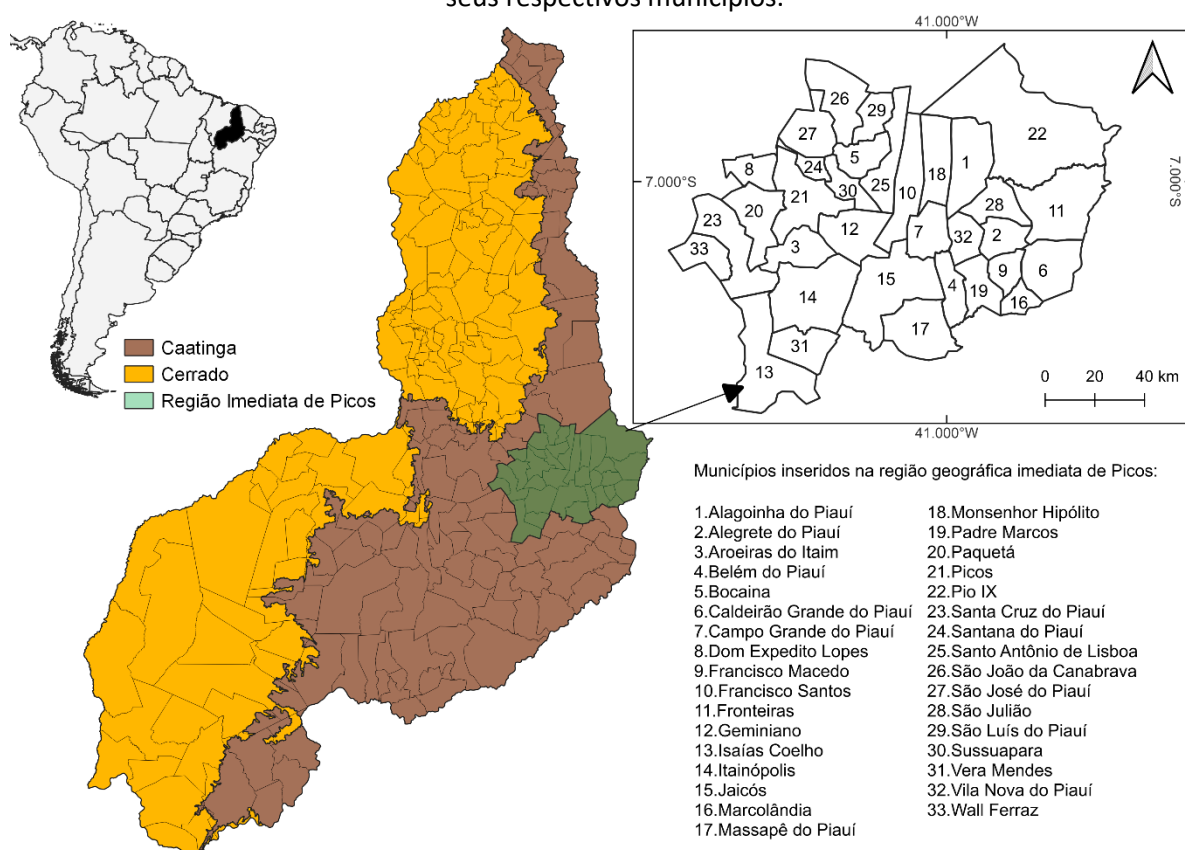
2. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa é de natureza quantitativa e a coleta de dados ocorreu a partir da análise documental dos acidentes provocados por aracnídeos registrados para os 33 municípios da região geográfica imediata¹ de Picos, Piauí (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE, 2017; Figura 1). Esses dados foram coletados junto ao Sistema de Informação de Agravos de Notificação (SINAN), correspondentes ao período de 2013 a 2023.

¹ As regiões geográficas imediatas são definidas por terem estruturas, a partir de seus centros urbanos, para a satisfação das necessidades imediatas das populações, tais como: compras de bens de consumo duráveis e não duráveis, busca de trabalho, procura por serviços de saúde e educação, e prestação de serviços públicos, entre outros (IBGE, 2017).

Severino (2017) define análise documental, sendo aquela que tem como fonte documentos no sentido amplo, não apenas documentos impressos, mas sobretudo de outros tipos de documentos, como documentos digitais obtidos em sites de internet, fotos, dentre outros. Desse modo, os conteúdos que ainda não tiveram nenhum tratamento analítico, são ainda matéria-prima, a partir da qual o pesquisador vai desenvolver sua investigação e análise (Severino, 2017).

Figura 1 – Mapa de localização do estado do Piauí, Brasil e inserção da região imediata de Picos, com seus respectivos municípios.



Fonte: Elaboração própria com base em dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – SIRGAS 2000.

As informações extraídas da base de dados citada foram: número de acidentes por município, ano, mês, tempo para o atendimento, local da picada, manifestações locais e sistêmicas, tipo de acidente com aranha, evolução dos casos, sexo e se gestante, raça, grau de escolaridade, idade, ocupação dos acidentados e local de moradia. Após a coleta dos dados, ocorreu a classificação e tabulação, de forma sistemática, antes da análise e interpretação conforme orientam Lakatos e Marconi (2003).

Para a classificação e enumeração das informações utilizou-se os materiais complementares constantes no Dicionário de dados – SINAN Net – Versão 5.0 para acidentes com animais peçonhentos (Brasil, 2010) e notificação individual (Brasil, 2018).

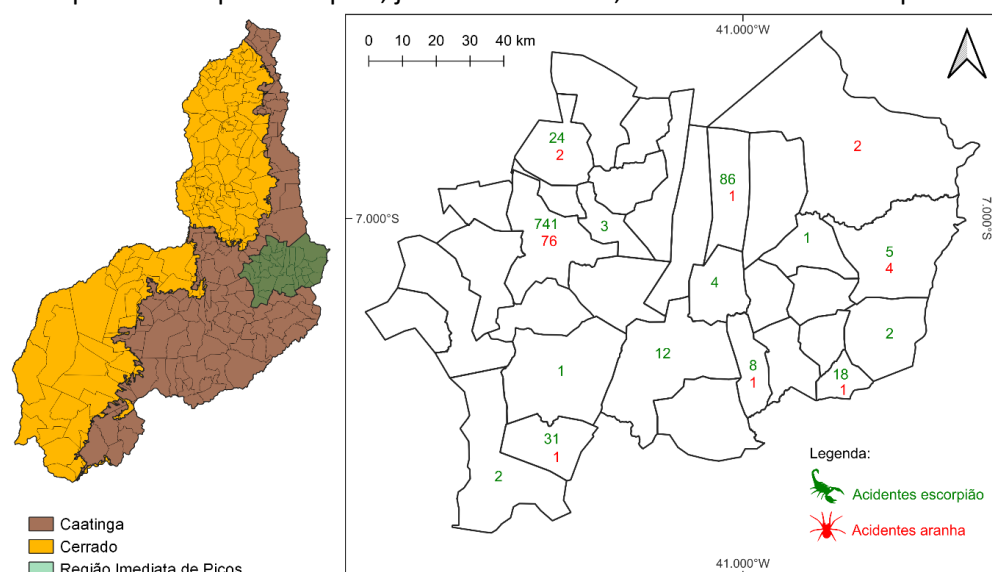
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um total de 1.110 acidentes provocados por aracnídeos foram contabilizados no intervalo de tempo analisado. O número de acidentes causados por escorpiões ($n = 1.022$) foi quase 12 vezes maior que aqueles provocados por aranhas ($n = 88$).

Os acidentes provocados por aracnídeos foram registrados em 15 (45,5%) dos 33 municípios que compõe a região geográfica imediata de Picos. Dos municípios em que houve registros de acidentes, Picos merece destaque pelo maior número de casos (73,6%), seguido de Monsenhor Hipólito (7,8%) e Pio IX (7,7%). Itainópolis e São Julião foram os que apresentaram os menores números de registros (0,1%, cada) (Figura 2).

Os municípios com o maior número de acidentes provocados por escorpiões foram Picos (72,5%), seguido de Monsenhor Hipólito (8,5%) (Figura 2B). Enquanto os municípios que tiveram mais registros de acidentes causados por aranhas foram Picos (86,4%) e Fronteiras ($n = 4,5\%$), enquanto Belém do Piauí, Marcolândia, Monsenhor Hipólito e Vera Mendes, somaram 4,5% dos registros de acidentes (Figura 2).

Figura 2 - Distribuição dos acidentes provocados por aracnídeos nos municípios da região geográfica imediata de Picos, Piauí, entre os anos de 2013 e 2023. Os números na cor verde representam os acidentes provocados por escorpião, já os em vermelho, os acidentes causados por aranhas.

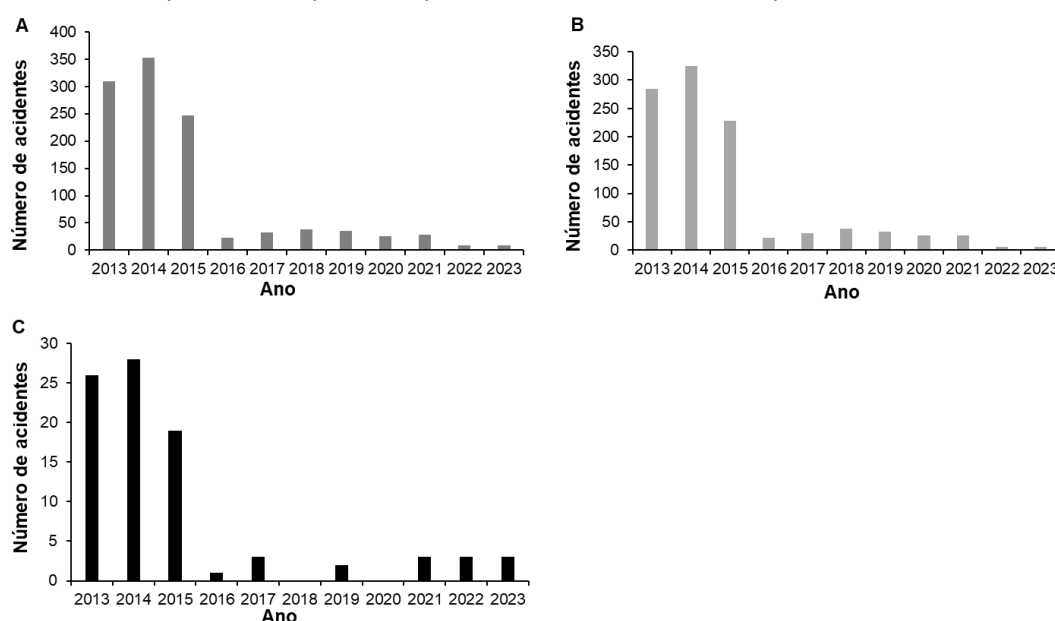


Fonte: Elaboração própria com base em dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – SIRGAS 2000.

O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) dos municípios analisados reflete a vulnerabilidade socioeconômica dessas regiões. Segundo dados do Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil, o município de Picos possui um IDH de 0,68, considerado médio, enquanto outros municípios como Monsenhor Hipólito (0,61) e Pio IX (0,59) apresentam IDH abaixo da média nacional (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - PNUD; Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA; Fundação João Pinheiro - FJP, 2024), o que implica em menores condições de infraestrutura e acesso a serviços básicos de saúde e educação. Picos, sendo o município de referência na região geográfica imediata analisada, geralmente recebe os casos médicos mais graves, o que pode inflacionar os números de acidentes registrados. Esta centralização do atendimento é comum em regiões com infraestrutura médica limitada, onde os municípios menores encaminham casos complexos para centros com melhor capacidade de atendimento.

Em relação ao ano de ocorrência dos acidentes, 2014 (31,8%) e 2013 (27,9%) se destacaram pelo maior número de casos, enquanto 2022 e 2023 (0,8%, cada) apresentaram os menores números (Figura 3A). Ao analisar os acidentes separadamente, o mesmo padrão foi observado, com destaque para 2014 e 2013 com os maiores números de casos (Figura 3B e C). Para as aranhas, não houve registros de casos em 2018 e 2020 (Figura 3C).

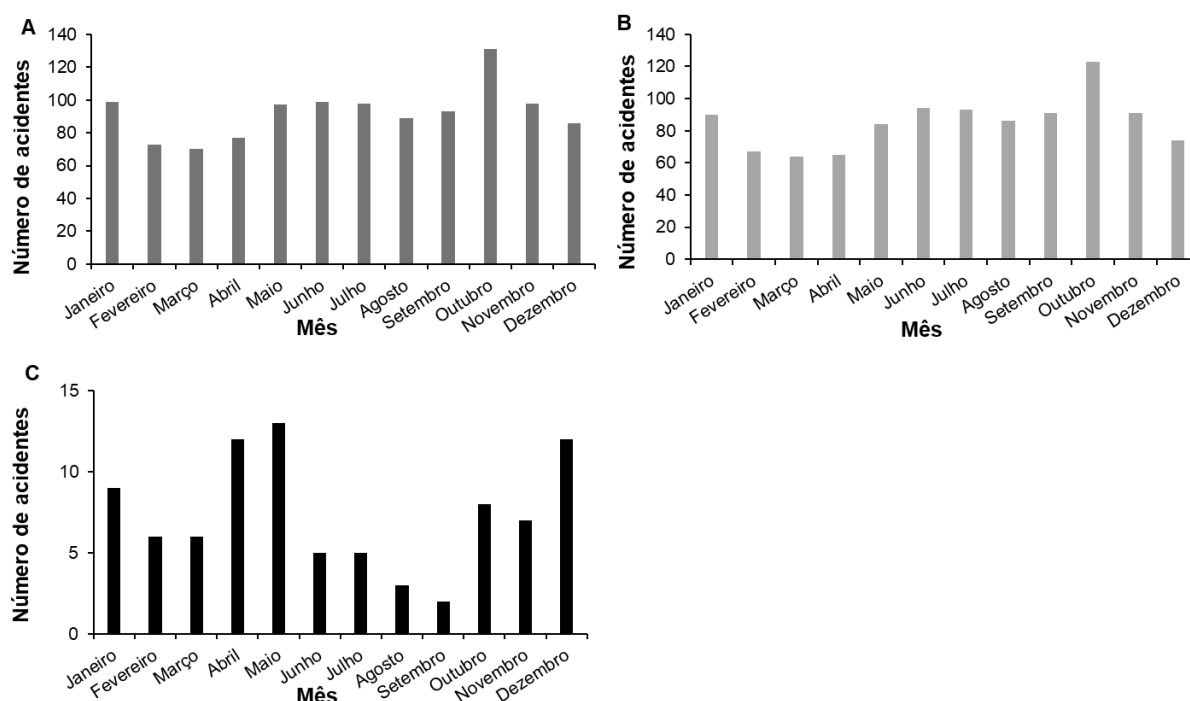
Figura 3 - Distribuição dos acidentes provocados por aracnídeos registrados nos municípios da região geográfica imediata de Picos, Piauí, entre 2013 e 2023. A: Total de acidentes; B: Acidentes provocados por escorpiões; C: Acidentes causados por aranhas.



Fonte: Autoria própria.

O mês com maior número de registros de acidentes foi outubro (11,8%) (Figura 4A). Os acidentes provocados por escorpiões ocorreram principalmente no período chuvoso da região (outubro a janeiro) (Figura 4B). Já para os acidentes causados por aranhas, observa-se os maiores números de casos nos meses de início de seca (abril e maio) (Figura 4C).

Figura 4 - Distribuição dos acidentes provocados por aracnídeos, registrados entre 2013 e 2023 nos municípios da região geográfica imediata de Picos, Piauí, de acordo com os meses de ocorrência. A: Total de acidentes; B: Acidentes provocados por escorpiões; C: Acidentes causados por aranhas.



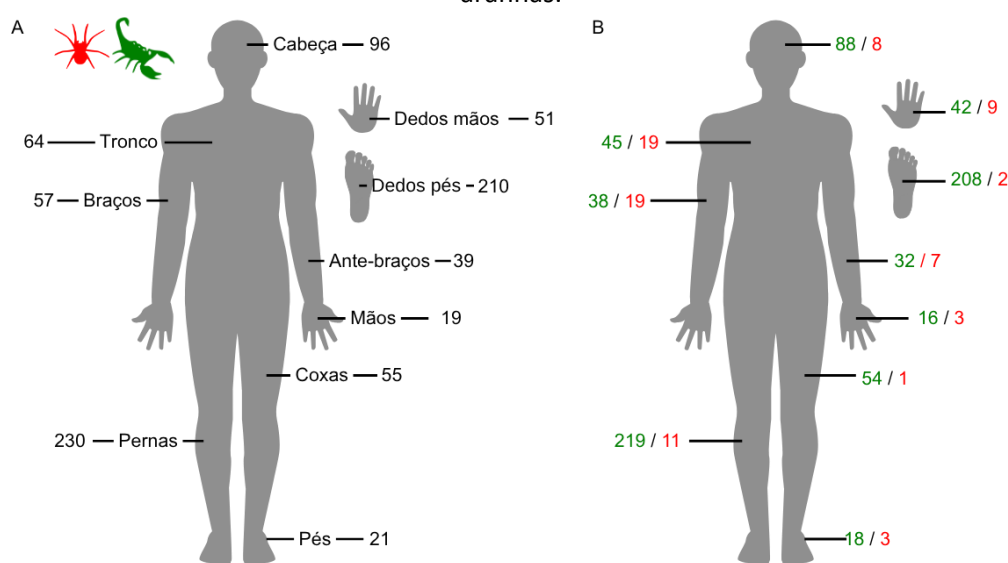
Fonte: Autoria própria.

A ocorrência de acidentes provocados por aracnídeos está intimamente relacionada à sazonalidade climática, caracterizada pelo aumento das chuvas e das temperaturas nos municípios estudados. Durante o período chuvoso, que se estende de outubro a janeiro, há um aumento significativo nos acidentes com escorpiões. Esse fenômeno é atribuído às alterações ecológicas provocadas pelas chuvas, quando os animais se deslocam em busca de locais secos, e acabam entrando nas residências pelos ralos e frestas (Brasil, 2024a). Essa movimentação facilita o contato entre escorpiões e pessoas, aumentando a ocorrência de acidentes.

Para os acidentes causados por aranhas, a maior incidência ocorre nos meses de abril e maio, que são os meses mais quentes do ano e coincidem com o período reprodutivo desses animais, reforçando os estudos de Souza e Machado (2017). Durante esse período, a atividade das aranhas aumenta significativamente, resultando em um maior número de acidentes.

Os resultados indicaram que as áreas do corpo mais afetadas com acidentes causados por aracnídeos foram os pés (24,2%), seguidos pelos dedos das mãos (19,8%) e mãos (19,5%) (Figura 5). Especificamente, para os acidentes provocados por escorpiões, as pernas (21,4%) e dedos dos pés (20,4%) foram as mais atingidas (Figura 5). Em contraste, os acidentes causados por aranhas destacaram-se pelo maior impacto no tronco e nos braços (21,6%, cada) (Figura 5).

Figura 5 - Áreas do corpo afetadas por acidentes provocados por aracnídeos, registrados entre 2013 e 2023 nos municípios da região geográfica imediata de Picos, Piauí Os números na cor verde representam os acidentes provocados por escorpião, já os em vermelho, os acidentes causados por aranhas.



Fonte: Autoria própria.

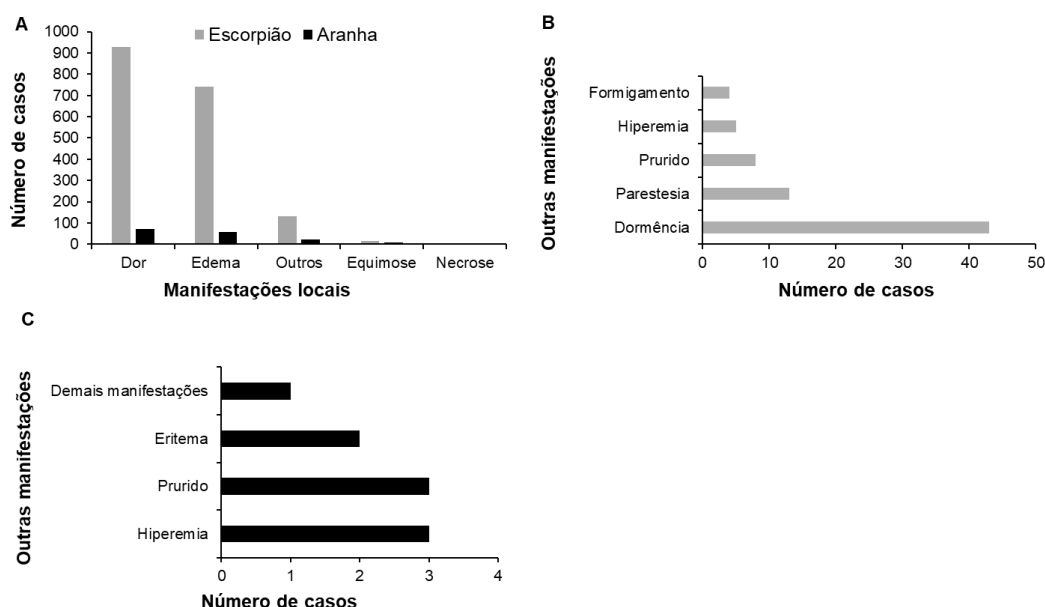
Como os escorpiões são animais noturnos adaptados ao calor, procuram esconderijos escuros durante o dia para evitar a claridade. Comumente, eles se abrigam em calçados, armários ou sob peças de roupas deixadas no chão, aumentando o risco de acidentes (Brasil, 2024b). Ao calçar sapatos ou realizar tarefas cotidianas sem a devida atenção, as pessoas podem estressar os escorpiões, que reagem picando. Para evitar esses acidentes, recomenda-se sacudir e verificar os sapatos e roupas antes de usá-los, manter os quintais e jardins limpos (Brasil, 2009).

No caso das aranhas, os acidentes são mais frequentes à noite, horário em que se encontram mais ativas, e ocorrem quando são comprimidas contra o corpo (São Paulo, 2015). Em áreas residenciais, aranhas adaptaram-se bem às condições domiciliares, podendo se esconder atrás de quadros, móveis, rodapés soltos, pilhas de tijolos e entulhos em geral (Brasil, 2024c). Portanto, ao realizar atividades cotidianas, como vestir roupas, usar toalhas

após o banho, fazer faxina doméstica é fundamental verificar a presença de aranhas nos objetos para evitar acidentes. Adotar essas precauções pode reduzir significativamente a ocorrência de acidentes com esses animais.

Quanto às manifestações locais, 94% dos acidentados por aracnídeos confirmam a manifestação de algum sintoma no local da inoculação da peçonha. Para os picados por escorpiões, 90,7% relataram dor e 72,5% edema (Figura 6A). Quanto aos acidentados por aranhas, 81,8% apresentaram dor e 64,8% edema (Figura 6A). Dos 73 casos em que houve o registro de outras manifestações locais, para os acidentes com escorpiões, a dormência se destacou (58,9%) (Figura 6B). Para as aranhas, nove vítimas apresentaram outras manifestações, evidenciando a hiperemia e o prurido (33,33%, cada) (Figura 6C).

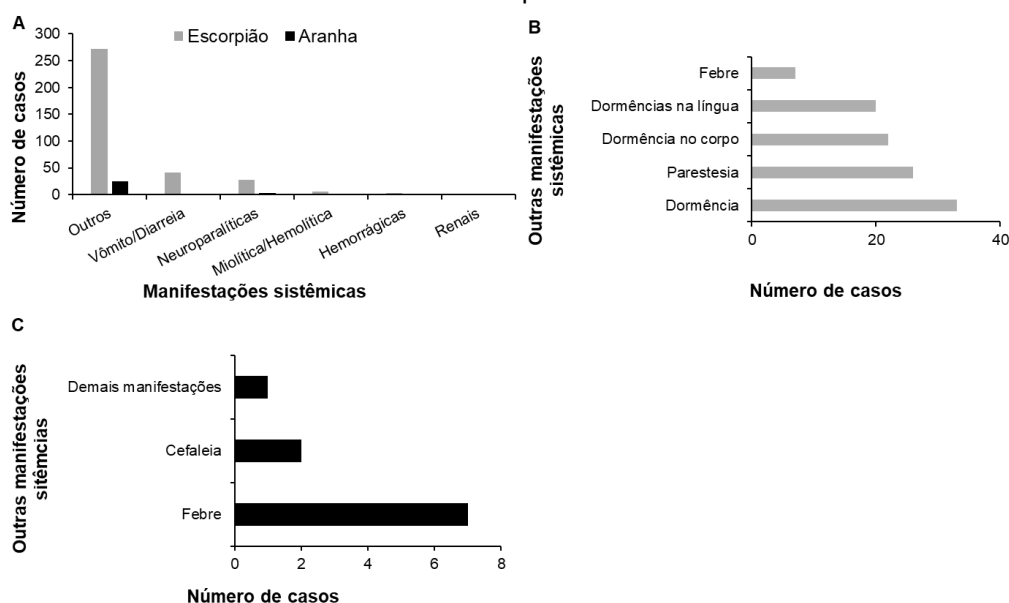
Figura 6 – Sintomas dos acidentados por aracnídeos registrados entre 2013 e 2023 nos municípios da região geográfica imediata de Picos, Piauí.



Fonte: Autoria própria.

Sobre as manifestações sistêmicas, 34% dos acidentados confirmam reações que ocorreram em todo o corpo ou em algumas regiões do corpo, além dos sintomas locais, devido à entrada da toxina no organismo. Para as vítimas dos escorpiões, vômito/diarreia foram apontados por 4% do total de casos; para os acidentados por aranhas, as manifestações neuromusculares ocorreram em 3,4% (Figura 7A). As outras manifestações sistêmicas, tanto para escorpiões como para aranhas, foram observadas para 26,6% e 28,4% do total de acidentes. A dormência prevaleceu para os acidentes provocados por escorpião (3,2%; Figura 7B) e a febre (8%) para as aranhas (Figura 7C).

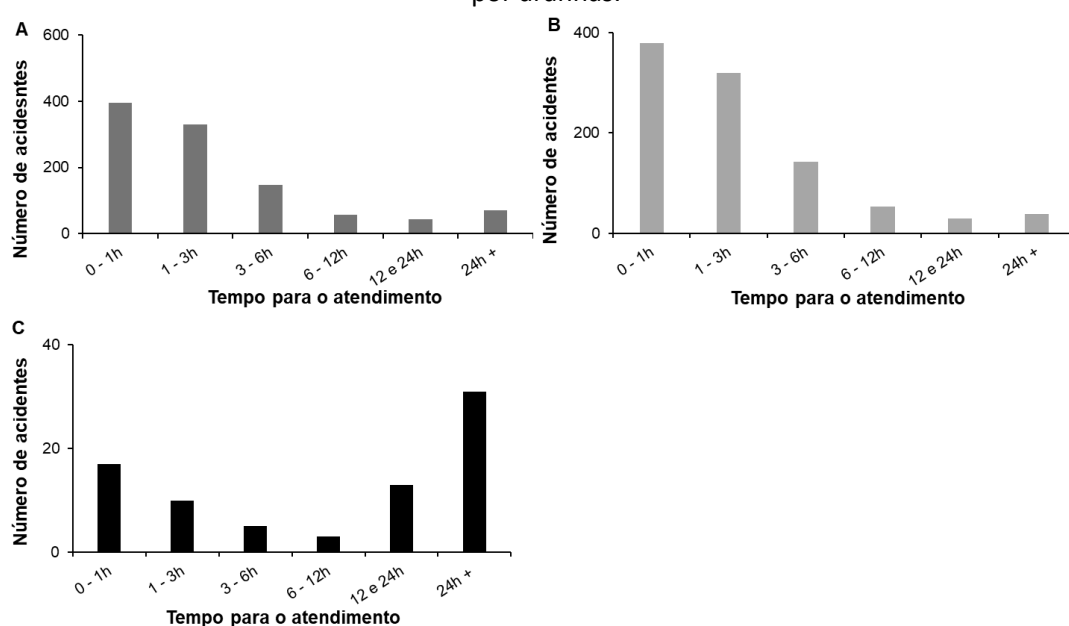
Figura 7 - Manifestações sistêmicas dos acidentados por aracnídeos registrados entre 2013 e 2023 nos municípios da região geográfica imediata de Picos, Piauí. A. Manifestações por escorpião e aranha. B. Escorpião. C. Aranha.



Fonte: Autoria própria.

Ao examinar o intervalo de tempo para o atendimento dos acidentados por aracnídeos, nota-se que para os escorpiões ele ocorre até as primeiras três horas (65,4%) (Figura 8). O tempo para o atendimento dos acidentados por aranhas, por sua vez se concentraram entre 12 e 24 horas após a picada (50%) (Figura 8).

Figura 8 - Distribuição dos acidentes provocados por aracnídeos registrados entre 2013 e 2023 nos municípios da região geográfica imediata de Picos, Piauí, por tempo de atendimento dos acidentados. A: Total de acidentes; B: Acidentes provocados por escorpiões; C: Acidentes causados por aranhas.



Fonte: Autoria própria.

Os acidentes com as espécies do gênero *Tityus* causam nos/as acidentados/as sintomas locais e sistêmicos (Brasil, 2022b). Segundo essa mesma fonte, as manifestações locais são: dor imediata em praticamente todos os casos, podendo se irradiar para o membro e ser acompanhada de parestesia, eritema e sudorese local; no quadro mais intenso, a dor ocorre nas primeiras horas após o acidente, e podem surgir manifestações sistêmicas logo após intervalo de minutos até poucas horas (duas a três), principalmente em crianças. Nesses casos há sudorese profusa, agitação psicomotora, tremores, náuseas, vômitos, sialorreia, hipertensão ou hipotensão arterial, arritmia cardíaca, insuficiência cardíaca congestiva, edema pulmonar agudo e choque (Brasil, 2022b).

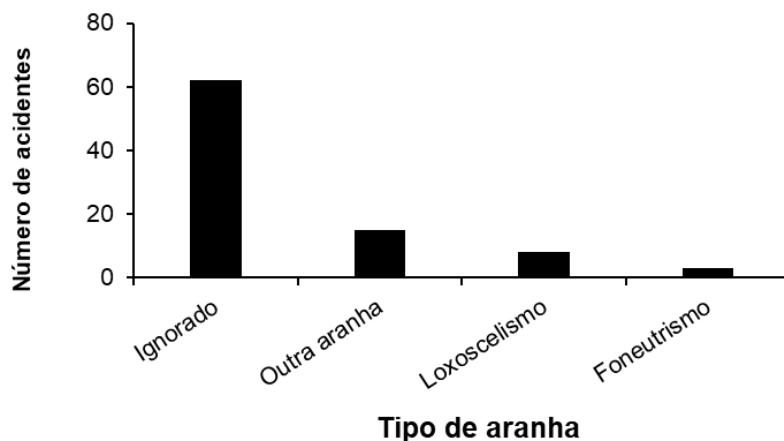
Os acidentados por aranhas do gênero *Phoneutria* podem apresentar sintomas locais ou sistêmicos. As manifestações locais são dor irradiada e de início imediato, que pode ser bastante intensa nas primeiras três a quatro horas após o acidente, podendo ser acompanhado por edema e sudorese no local e por parestesia ao longo do membro (Brasil, 2022c). Segundo a mesma fonte, nas manifestações sistêmicas, os/as acidentados/as podem apresentar taquicardia, hipertensão arterial, agitação psicomotora e vômitos.

Os acidentes por aranhas *Latrodectus* provocam manifestações locais como dor local de pequena intensidade, que evolui com sensação de queimação; pápula eritematosa e sudorese localizada; enquanto, as manifestações sistêmicas são alterações motoras como dor irradiada; contrações espasmódicas dos membros inferiores; tremores; dor com rigidez abdominal; e como manifestações menos frequentes acontecem a opressão precordial, taquicardia e hipertensão arterial, náuseas, vômitos, sialorreia (Brasil, 2022c). O tempo para o atendimento das vítimas observado nesse estudo corrobora com as manifestações dos sintomas locais e sistêmicos, com os acidentes provocados por escorpiões exigindo atendimento imediato, enquanto o por aranhas, tardio.

Do total de acidentes provocados por aranhas, 9,1% foram causados por aranha-marrom (espécies do gênero *Loxosceles*) (loxoscelismo) e 3,4% por aranha-armadeira (espécies do gênero *Phoneutria*) (foneutrismo) (Figura 9). Essas aranhas têm como habitat natural as áreas de mata, mas, com o desmatamento e a consequente urbanização, passaram a se fixar nos ambientes urbanos, inclusive dentro de residências, especialmente no interior de armários e em depósitos, aumentando o número de acidentes (Instituto Butantan, 2024). Salientando que as aranhas tendem apenas a se defenderem e irão picar alguém se caso

sentirem ameaçadas, e é comum fugirem ao se depararem com pessoas (Instituto Butantan, 2022).

Figura 9 - Distribuição dos acidentes provocados por aranhas registradas entre 2013 e 2023 nos municípios da região geográfica imediata de Picos, Piauí.



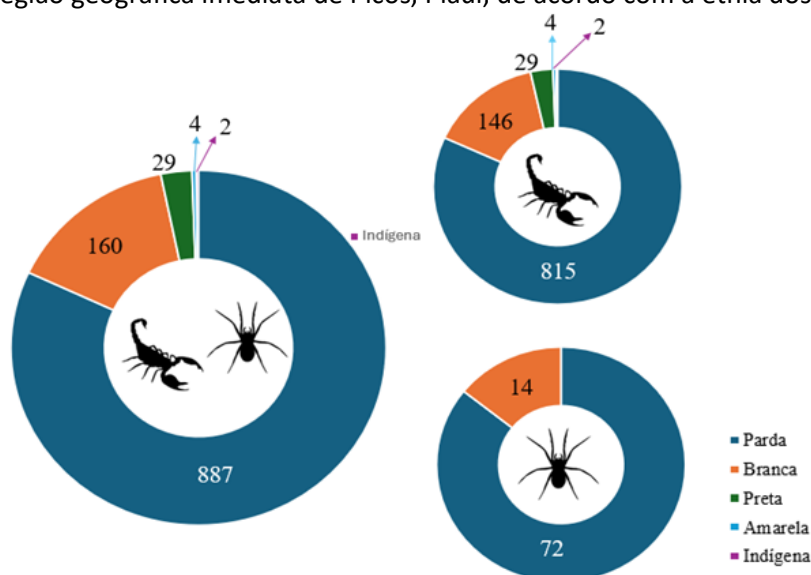
Fonte: Autoria própria.

Com relação à gravidade dos acidentes com aracnídeos, 66,3% do provocados por escorpiões foram categorizados como leves e 21% como moderado. Os acidentes por aranhas seguiram o mesmo padrão: 64,7% leves e 23,9% moderados. Nenhum caso evoluiu para óbito.

Em relação aos aspectos sociodemográficos dos acidentados, constatou-se que pessoas do sexo feminino sofreram mais acidentes por aracnídeos que aquelas do sexo masculino, contribuindo com cerca de 55% dos casos gerais, provocados por escorpiões e por aranhas (Figura 10). Dezesesseis mulheres acidentadas (1,4%) encontravam-se gestantes, entre o primeiro e o terceiro trimestre. Todas foram picadas por escorpiões. Devido a questões culturais no Brasil, as atividades domésticas são geralmente atribuídas às mulheres, expondo-as a um maior risco de contato com esses animais (IBGE, 2024), o que justifica os resultados obtidos na presente pesquisa.

Em relação a etnia, a maior parte das vítimas se identificaram como pardas (79,9%) e brancas (14,4%), enquanto as autodeclaradas pretas, amarelas e indígenas somaram 3,2% (Figura 10). As vítimas mais atingidas de picadas de escorpiões foram também as pardas (79,7%) e brancas (14,2%) (Figura 10), assim como as acidentadas por aranhas (81,8% e 15,9% de pessoas pardas e brancas, respectivamente (Figura 10).

Figura 10 - Distribuição dos acidentes provocados por aracnídeos registrados entre 2013 e 2023 nos municípios da região geográfica imediata de Picos, Piauí, de acordo com a etnia dos acidentados.



Fonte: Autoria própria.

Conforme o Censo Demográfico de 2022 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população brasileira é composta por 92.083.286 pardos, 88.252.121 brancos, 20.656.458 pretos, 1.694.836 indígenas e 850.130 amarelos (IBGE, 2022). Dado que os grupos pardo e branco são os mais numerosos, é natural observar um maior número de acidentes com aracnídeos entre esses grupos. No entanto, para uma análise mais precisa, é necessário considerar a taxa de incidência (número de acidentes por 100.000 pessoas) e fatores socioeconômicos e ambientais que podem influenciar a frequência desses acidentes. Assim, a maior população não necessariamente implica maior taxa de acidentes sem considerar essas variáveis.

Daqueles que tiveram seu grau de escolaridade registrado, os mais acidentados declaram possuir apenas o Ensino Fundamental (28,4%), seguido de Ensino Médio (9,2%), Analfabeto (5,0%) e Ensino Superior (3,2%) (Figura 11). Destaca-se o número de casos em que essa informação foi ignorada ($n = 507$, 45,7%).

Figura 11 - Distribuição dos acidentes provocados por aracnídeos registrados entre 2013 e 2023 nos municípios da região geográfica imediata de Picos, Piauí, de acordo com o grau de escolaridade dos acidentados.

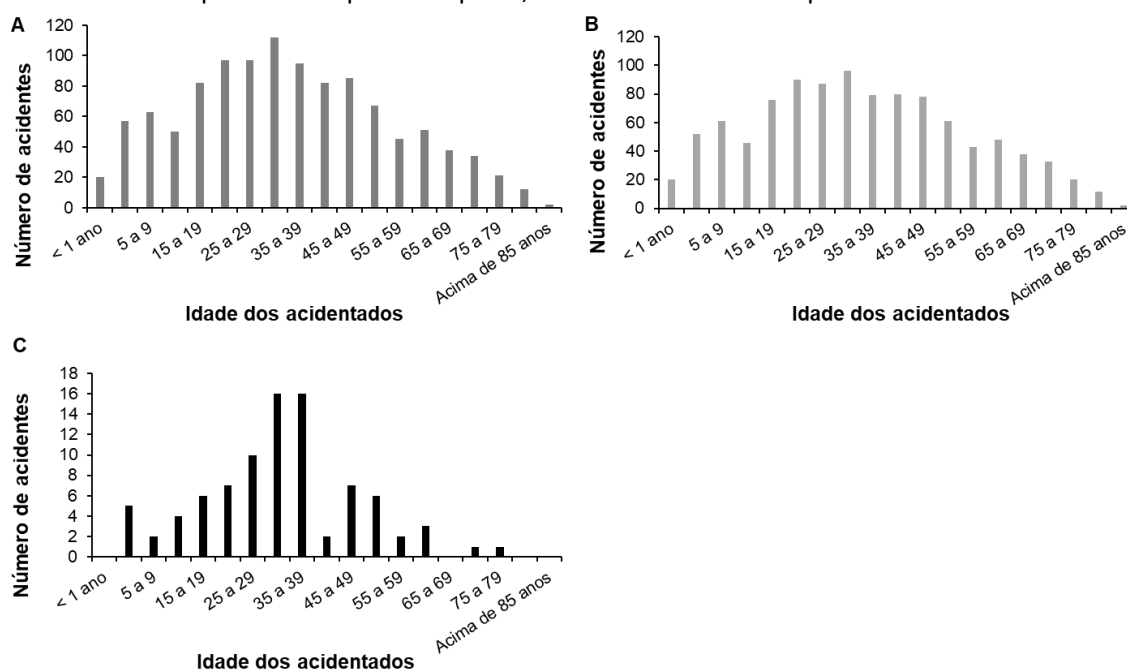


Fonte: Autoria própria.

Conforme Almeida *et al.* (2021), a alta incidência de escorpionismo está fortemente associada a condições socioeconômicas desfavoráveis e à urbanização precária, que são agravadas por questões como a oferta de emprego, o nível de educação, a participação feminina no mercado de trabalho, diferenças culturais e a eficácia das equipes de vigilância em saúde. A baixa escolaridade dos acidentados, em particular, é um fator significativo que contribui para a alta incidência de acidentes com os aracnídeos peçonhentos. Infelizmente, observa-se uma negligência por parte do sistema de saúde em relação a essa questão, evidenciada pela parcela significativa de acidentados cujo grau de escolaridade não foi registrado. Essa lacuna pode dificultar o desenvolvimento e a implementação de políticas públicas eficazes para diminuição no número de acidentes.

Ao analisar a idade dos acidentados, as faixas etárias mais afetadas foram as de 30 a 34 anos (10,9%), seguida de 20 a 24 anos e 25 a 29 anos (8,7%, cada). Os menos afetados foram entre 80 e 84 anos (1,1%) e acima de 85 anos (0,2%) (Figura 12A). As faixas etárias de 30 a 34 anos, de 20 a 24 anos e 25 a 29 ano contribuíram, respectivamente, com 9,4%, 8,8% e 8,5% dos acidentes provocados por escorpiões (Figura 12B). Para os acidentes provocados pelas aranhas, as faixas etárias de 30 a 34 anos e 35 a 39 anos somaram 36,4% dos casos (Figura 12C). É importante destacar que crianças menores de um ano, pessoas com idade entre 65 e 69, 80 e 84 e acima de 85 anos não foram acometidas com picadas de aranhas no intervalo de tempo avaliado (Figura 12C).

Figura 12 – Faixa etária dos acidentados por aracnídeos registrados entre 2013 e 2023, nos municípios da região geográfica imediata de Picos, Piauí. A: Total de acidentes; B: Acidentes provocados por escorpiões; C: Acidentes causados por aranhas.

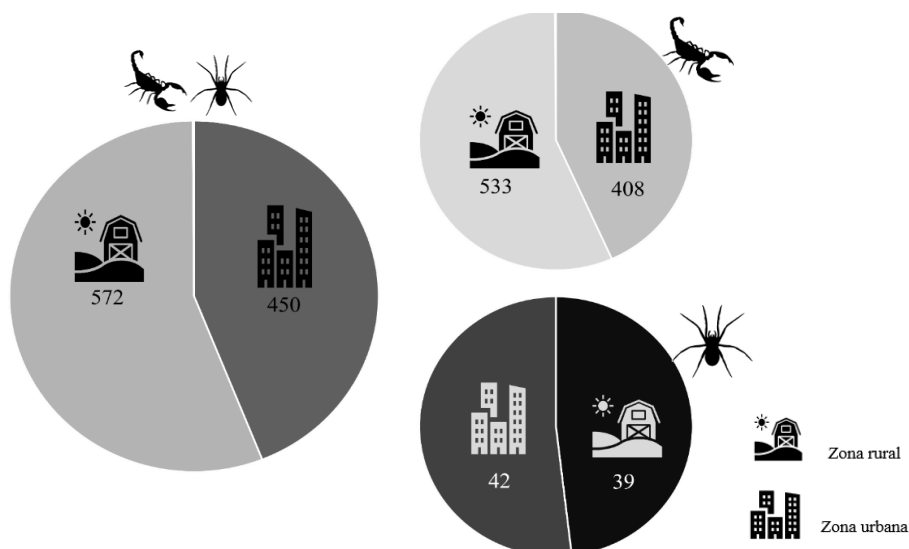


Fonte: Autoria própria.

Um total de 65 ocupações foram identificadas entre os acidentados. Entre elas foram distribuídos 540 casos (48,6%). Os mais acidentados foram os trabalhadores rurais (17,9%), seguidos dos estudantes (11,2%) e os aposentados ou pensionistas (5,3%). Dentre as 56 ocupações dos acidentados pelos escorpiões, a maior proporção foi composta pelos trabalhadores rurais (14,7%), seguida dos estudantes (11,4%). Já dos casos de acidentes provocados por aranhas, 20 ocupações puderam ser reconhecidas, com 10% dos casos ocorrendo com trabalhadores rurais, 9% com estudantes e 5,7% com donas de casa. Dos acidentados, 10,7% e 3,4% das vítimas de escorpiões e aranhas, respectivamente, relacionaram os casos ao trabalho.

Esses dados são reforçados quando se examina a distribuição dos casos de acidentes por aracnídeos por localização de moradia, com o maior número de acidentes causados por escorpiões ocorrendo com aqueles que residem em áreas rurais (51,5%) (Figura 13). Já para aranhas, os acidentes foram mais numerosos em áreas urbanas (47,7%) (Figura 13).

Figura 13 - Distribuição dos acidentes provocados por aracnídeos registrados entre 2013 e 2023 nos municípios da região geográfica imediata de Picos, Piauí, de acordo com localização da moradia dos acidentados.



Fonte: Autoria própria.

Os trabalhadores rurais são os mais acometidos por esses acidentes devido à maior exposição ao risco. Esse risco pode ser mitigado por meio de medidas de proteção, como o uso de roupas apropriadas, botas de cano alto e perneiras, que impedem o contato com esses animais (Paraná, 2022). A elevada ocorrência de acidentes com escorpiões em áreas rurais decorre da combinação entre a disponibilidade de habitats favoráveis e a maior exposição ocupacional dos trabalhadores rurais ao realizar atividades no campo (Santana; Suchara, 2015). Para os acidentes com aranhas, a maior ocorrência em áreas urbanas está relacionada ao desmatamento e à crescente urbanização, que deslocam esses animais para ambientes domésticos, como residências e seus arredores (Instituto Butantan, 2024).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do número representativo dos acidentes ocasionados por aracnídeos peçonhentos na região geográfica imediata de Picos, Piauí, observados na presente pesquisa, percebe-se que se trata de um problema de saúde pública, principalmente se considerarmos as características sociodemográficas das vítimas. Esses resultados indicam a urgência na implementação de planejamento e execução de ações eficazes que visem a redução dos acidentes e a promoção de um ambiente seguro para a população, principalmente no período em que há aumento da temperatura e das chuvas na região, meses em que se percebeu maior

número de casos. Essas medidas devem ser de cunho multidisciplinar, com a colaboração entre autoridades de saúde, instituições de ensino e pesquisa e comunidades locais.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. C. C.; MISE, Y.F.; CARVALHO, F. M.; SILVA, R. M. L. Associação ecológica entre fatos socioeconômicos, ocupacionais e de saneamento e a ocorrência de escorpionismo no Brasil, 2017-2019. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v.30, n.4, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ress/a/99jh4C4Ty5LYd6Gs4dMwc4N/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 01 nov. 2025.

ASSOCIAÇÃO PAULISTA DE MEDICINA. **Panorama dos acidentes causados por escorpiões no Brasil em dez anos**. São Paulo, 2023. Disponível em: [https://www.apm.org.br/ultimas-noticias/panorama-dos-acidentes-causados-por-escorpioes-no-brasil-em-dez-anos/#:~:text=Notifica%C3%A7%C3%A3o\)%20desde%202004.-,Nos%20%C3%BAltimos%2010%20anos%2C%20houve%20aumento%20de%20149%2C3%25,que%20correspondeu%20a%20159.934%20registros](https://www.apm.org.br/ultimas-noticias/panorama-dos-acidentes-causados-por-escorpioes-no-brasil-em-dez-anos/#:~:text=Notifica%C3%A7%C3%A3o)%20desde%202004.-,Nos%20%C3%BAltimos%2010%20anos%2C%20houve%20aumento%20de%20149%2C3%25,que%20correspondeu%20a%20159.934%20registros). Acesso em: 01 nov. 2025.

BRASIL. **Doenças infecciosas e parasitárias**: guia de bolso. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2008. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/doencas_infecciosas_parasitaria_guia_bolso.pdf. Acesso em: 01 nov. 2025.

BRASIL. **Manual de controle de escorpiões**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2009. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/manual_controle_escorpioes.pdf. Acesso em: 01 nov. 2025.

BRASIL. **Dicionário de dados – SINAN NET – Versão 5.0**. Notificação individual. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2018. Disponível em: http://www.portalsinan.saude.gov.br/images/documentos/Agravos/Notificacao_Individual/DIC_DADOS_NET---Notificao-Individual_rev.pdf. Acesso em: 01 nov. 2025.

BRASIL. **Estudo aponta que aranhas ocupam terceiro lugar no número de acidentes com animais peçonhentos**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2022a. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/noticias/2022/agosto/estudo-aponta-que-aranhas-ocupam-terceiro-lugar-no-numero-de-acidentes-com-animais-peconhentos#:~:text=As%20informa%C3%A7%C3%B5es%20coletadas%20pelo%20Sistema%20de%20Informa%C3%A7%C3%A3o%20de,de%2012%2C97%25%20dos%20casos%2C%20foram%20ocasionados%20por%20aranhas>. Acesso em: 01 nov. 2025.

BRASIL. **Medidas simples podem manter escorpiões longe de residências e evitar acidentes**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2022b. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/noticias/2022/julho/medidas-simples>

podem-manter-escorpioes-longo-de-residencias-e-evitar-acidentes. Acesso em: 01 nov. 2025.

BRASIL. **Guia de Vigilância em Saúde**. 5. ed. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2022c. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/guia_vigilancia_saude_5ed_rev_atual.pdf. Acesso em: 01 nov. 2025.

BRASIL. **Boletim epidemiológico: acidentes escorpiônicos no Brasil em 2022**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2024a. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins/epidemiologicos/edicoes/2024/boletim-epidemiologico-volume-55-no-03. Acesso em: 01 nov. 2025.

BRASIL. **Guia de vigilância em saúde**. 6 ed. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2024b. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/guia_vigilancia_saude_6ed_v3.pdf. Acesso em: 01 nov. 2025.

BRASIL. **Guia de animais peçonhentos do Brasil**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2024c. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/a/animais-peconhentos/publicacoes/guia-animais-peconhentos-do-brasil.pdf/view. Acesso em: 01 nov. 2025.

CEARÁ. **Boletim animais peçonhentos ano 2020**. Fortaleza: Secretaria da Saúde do Governo do Estado do Ceará, 2020. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.saude.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/9/2018/06/boletim_animais_peconhentos_27_11_2020.pdf. Acesso em: 01 nov. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE. **Divisão Regional do Brasil em Regiões Geográficas Imediatas e Regiões Geográficas Intermediárias**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100600.pdf. Acesso em: 01 nov. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE. **Censo 2022**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/38719-censo-2022-pela-primeira-vez-desde-1991-a-maior-parte-da-populacao-do-brasil-se-declara-parda. Acesso em: 01 nov. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE. **Mulheres pretas ou pardas gastam mais tempo em tarefas domésticas, participam menos do mercado de trabalho e são mais afetadas pela pobreza**. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/39358-mulheres-pretas-ou-pardas-gastam-mais-tempo-em-tarefas-domesticas-participam-menos-do-mercado-de-trabalho-e-sao-mais-afetadas-pela-pobreza#:~:text=Em%202022%2C%20enquanto%20as%20mulheres,tarefas%20do%20que%20as%20brancas. Acesso em: 01 nov. 2025.

INSTITUTO BUTANTAN. **Controle de escorpiões de importância em saúde**. São Paulo: Instituto Butantan, 2019. Disponível em: <https://repositorio.butantan.gov.br/handle/butantan/3363>. Acesso em: 01 nov. 2025.

INSTITUTO BUTANTAN. **Maioria das aranhas que vive nas cidades não é venenosa; conheça as mais perigosas**. São Paulo: Instituto Butantan, 2022. Disponível em: <https://butantan.gov.br/noticias/maioria-das-aranhas-que-vive-nas-cidades-nao-e-venenosa--conheca-as-mais-perigosas>. Acesso em: 01 nov. 2025.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Editora Atlas S.A, 2003.

LIMA, E. C.; SOARES, G. R. A.; PINHO, L. Caracterização de crianças hospitalizadas vítimas de acidentes por animais peçonhentos. **Revista de Enfermagem da Universidade Federal de Santa Maria**, v. 6, n. 2, p. 206-213, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reufsm/article/view/16633>. Acesso em: 01 nov. 2025.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE - OMS. **Avanços para superar o impacto global de doenças tropicais negligenciadas**. Primeiro relatório da OMS sobre doenças tropicais negligenciadas, Genebra, 2012. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/primeiro_relatorio_oms_doencas_tropicais.pdf. Acesso em: 01 nov. 2025.

PARANÁ. **Saúde alerta para cuidados em caso de acidentes com animais peçonhentos no verão**. Florianópolis: Secretaria de Estado da Comunicação do Governo do Estado do Paraná, 2022. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Saude-alerta-para-cuidados-em-caso-de-acidentes-com-animais-peconhentos-no-verao>. Acesso em: 01 nov. 2025.

PIRES, A. T. T.; PIRES, V. R.; OLIVEIRA, E. S.; ARAÚJO, I. G.; LIMA, M. E. G.; ALBURQUERQUE, S. P.; AGUIAR, V. G.; LOPES, E. M. S.; RODRIGUES, J. P. V.; SILVESTRE, J. V. C.; ROMEU, G. A.; MORAIS, A. C. L. N. Panorama dos acidentes por animais peçonhentos no estado do Ceará. In: PIRES, A. T. T.; PIRES, V. R.; OLIVEIRA, E. S.; ARAÚJO, I. G.; LIMA, M. E. G.; ALBURQUERQUE, S. P.; AGUIAR, V. G.; LOPES, E. M. S.; RODRIGUES, J. P. V.; SILVESTRE, J. V. C.; ROMEU, G. A.; MORAIS, A. C. L. N. Saúde e Ambiente. **Interfaces Científicas**, v. 9, n. 2, p. 319-334, 2023. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/saude/article/view/11417>. Acesso em: 01 nov. 2025.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO - PNUD. **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil**. Disponível em: <http://www.atlasbrasil.org.br/acervo/atlas>. Acesso em: 01 nov. 2025.

SANTANA, V. T. P.; SUCHARA, E. A. Epidemiologia dos acidentes com animais peçonhentos registrados em Nova Xavantina - MT. **Revista de Epidemiologia e Controle de Infecção**, v. 5, n. 3, 2015. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/5704/570463811005.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2025.

- SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 24. ed. São Paulo: Cortez, 2017.
- SOUZA, C. M. V.; MACHADO, C. Animais peçonhentos de importância médica no município do rio de janeiro. **Journal Health NPEPS**, v. 2, n. 1, 2017. Disponível em: <https://periodicos.unemat.br/index.php/jhnpeps/article/view/1775>. Acesso em: 01 nov. 2025.
- SISTEMA DE INFORMAÇÃO DE AGRAVOS DE NOTIFICAÇÃO - SINAN. **Acidentes por animais peçonhentos**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2016. Disponível em: <http://www.portalsinan.saude.gov.br/acidente-por-animais-peconhentos>. Acesso em: 01 nov. 2025.

CAPÍTULO VIII

ECOLOGIA DA CAATINGA NO SEMIÁRIDO: UMA REVISÃO INTEGRATIVA

ECOLOGY OF THE CAATINGA IN THE SEMIARID REGION: AN INTEGRATIVE REVIEW

DOI: 10.51859/ampla.mas5450-8

Eliandra Ferreira da Costa Santos ¹

Janúncio Ferreira Rodrigues ²

Rene Cleiton da Silva ³

Maria José de Holanda Leite ⁴

Denise Maria Santos ⁵

¹ Especialização em Educação Ambiental e Geografia do Semiárido. Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) - Campus Pau dos Ferros.

² Especialização em Educação Ambiental e Geografia do Semiárido. Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) - Campus Pau dos Ferros.

³ Especialização em Educação Ambiental e Geografia do Semiárido. Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) - Campus Pau dos Ferros.

⁴ Doutora em Ciência Florestais e Professora de Biologia do Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) - Campus Pau dos Ferros.

⁵ Doutora em Geociências. Instituto Dom José de Educação e Cultura IDJ, vinculado a UVA de Sobral.

RESUMO

A Caatinga, bioma exclusivamente brasileiro, ocupa cerca de 844.000 km² no semiárido, abrigando aproximadamente 1.500 espécies vegetais, das quais 380 são endêmicas, e cerca de 500 espécies animais adaptadas às condições de baixa pluviosidade e altas temperaturas. Contudo, o bioma enfrenta estigmas de pobreza e degradação, tendo perdido cerca de 16% de sua cobertura nas últimas duas décadas devido ao desmatamento, à extração de lenha, à agricultura, à pecuária, à mineração e às mudanças climáticas. Estas últimas projetam um aumento médio de 4 °C na temperatura e uma redução de 0,3 mm/dia na precipitação até 2100, afetando nascentes e os meios de subsistência de 28,6 milhões de habitantes. A Educação Ambiental (EA) é fundamental para reverter essa narrativa, promovendo a valorização ecológica, a integração entre saberes científicos e populares e a sustentabilidade. No entanto, os materiais didáticos ainda se limitam a abordagens superficiais, geralmente restritas às áreas de Geografia e Ciências. Iniciativas de formação continuada em municípios como Cariri, Sumé, Campina Grande (PB)

e Juazeiro (BA) já capacitaram mais de 700 professores, fortalecendo a interdisciplinaridade. Projetos escolares, como o de arborização em Penaforte (CE), o teatro de fantoches em Sergipe, a recuperação de nascentes em Monteiro (PB), as hortas escolares em Petrolina (PE), as ações de educação indígena em Alagoas e o projeto “Cidadão Planetário” em Caldeirão Grande (BA), têm engajado comunidades e se alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Assim, a EA contextualizada fortalece a conservação, combate à desertificação (que já afeta cerca de 15% do bioma) e resgata a identidade cultural, promovendo a alfabetização climática e práticas sustentáveis no semiárido.

Palavras-chave: Educação Ambiental. Sustentabilidade. Desertificação.

ABSTRACT

The Caatinga, an exclusively Brazilian biome, covers approximately 844,000 km² in the semiarid region and shelters around 1,500 plant species, 380 of them endemic, and about 500 animal species adapted to low rainfall and high temperatures.



However, it faces persistent stigmas of poverty and degradation, having lost roughly 16% of its vegetation cover over the past two decades due to deforestation, firewood extraction, agriculture, livestock, mining, and climate change. The latter is projected to increase average temperatures by up to 4 °C and reduce rainfall by 0.3 mm/day by 2100, threatening springs and the livelihoods of 28.6 million inhabitants. Environmental Education (EE) plays a crucial role in reversing this scenario by fostering ecological awareness, integrating scientific and traditional knowledge, and promoting sustainability. Nevertheless, educational materials often present superficial approaches, usually limited to Geography and Science. Continuing education programs in regions such as Cariri, Sumé, Campina Grande (PB), and Juazeiro (BA) have

trained more than 700 teachers, strengthening interdisciplinarity. School projects, such as urban tree planting in Penaforte (CE), puppet theater in Sergipe, spring restoration in Monteiro (PB), school gardens in Petrolina (PE), indigenous education initiatives in Alagoas, and the “Planetary Citizen” project in Caldeirão Grande (BA), have engaged communities and aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs). Thus, context-based EE enhances conservation, combats desertification (which affects about 15% of the biome), and reinforces cultural identity by promoting climate literacy and sustainable practices in the semiarid region.

Keywords: Environmental Education. Sustainability. Desertification.

1. INTRODUÇÃO

A Caatinga, único bioma exclusivamente brasileiro, abrange cerca de 844.000 km², aproximadamente 10% do território nacional, distribuindo-se predominantemente pelo semiárido nordestino. Nessa região, vivem cerca de 28,6 milhões de habitantes que dependem diretamente de seus serviços ecossistêmicos, como a regulação hídrica, a proteção do solo e o suporte à agricultura familiar (IBGE, 2023; MMA, 2023). O bioma caracteriza-se por uma biodiversidade singular, com cerca de 1.500 espécies vegetais, sendo 380 endêmicas, destacando-se as famílias Leguminosae e Cactaceae, além de aproximadamente 500 espécies animais, das quais 15% são aves endêmicas. Sua vegetação apresenta adaptações xerofíticas notáveis, como a caducifolia e sistemas radiculares profundos, que permitem a sobrevivência sob índices pluviométricos variando entre 250 e 1.000 mm anuais (Leal et al., 2005; Machado; Lopes, 2003).

Historicamente, a ocupação da Caatinga por povos indígenas, comunidades quilombolas e colonos moldou sua paisagem e práticas produtivas. No entanto, esse processo contribuiu para a construção de estigmas que associam o bioma à seca, à pobreza e à marginalização social, visões frequentemente reforçadas por abordagens midiáticas e políticas públicas descontextualizadas (Abílio et al., 2010; Silva et al., 2017).

Atualmente, a degradação ambiental ameaça significativamente a integridade ecológica da Caatinga, com estimativas indicando que entre 60% e 70% de sua cobertura original já foi alterada e cerca de 15% apresenta processos de desertificação. Essa degradação compromete a diversidade beta e o elevado endemismo do bioma, especialmente em áreas

de solos arenosos, como as dunas do Rio São Francisco, onde cerca de 50% dos lagartos são endêmicos (Castelletti et al., 2003; Rodrigues, 2003). As mudanças climáticas intensificam essa vulnerabilidade, projetando cenários de aridificação, perda de nascentes e redução da resiliência das comunidades rurais (Marengo et al., 2017).

Nesse contexto, a Educação Ambiental (EA) crítica, inspirada em Freire (2005), emerge como estratégia transformadora, ao articular saberes científicos e tradicionais na promoção da sensibilização ecológica, da conservação dos recursos naturais e da valorização cultural das comunidades sertanejas.

Esta revisão de literatura, fundamentada em obras como Ecologia e Conservação da Caatinga (Leal et al., 2005) e estudos climáticos recentes (Torres et al., 2017), discute as principais ameaças ecológicas ao bioma, a formação docente, os projetos escolares, as percepções socioambientais e as políticas públicas relacionadas, propondo caminhos para a sustentabilidade e a resiliência socioecológica da Caatinga.

2. AMEAÇAS ECOLÓGICAS E PERSISTÊNCIA DE ESTIGMAS

A Caatinga é um dos biomas mais ameaçados do Brasil, com cerca de 60 a 70% de sua cobertura alterada e aproximadamente 15% de áreas desertificadas. Esse processo é impulsionado pelo desmatamento, pela extração de lenha, responsável pela remoção de cerca de 50% da biomassa vegetal, pela agricultura extensiva, pela pecuária, na qual 12 milhões de cabras consomem cerca de 70% da vegetação, e pela mineração nas bacias dos rios São Francisco e Parnaíba (IBGE, 2023; Castelletti et al., 2003). As mudanças climáticas intensificam a desertificação, com projeções de aumento de até 4°C na temperatura média e redução de 0,3 mm/dia na precipitação até 2100, o que pode reduzir em 20% as nascentes e agravar os processos erosivos em áreas como São Domingos do Cariri (PB), onde a desertificação passou de 68,9% em 1989 para 78,5% em 2005 (INPE, 2023; Marengo et al., 2017).

Esses impactos ameaçam espécies endêmicas, como o tatu-bola e a arara-azul-de-lear, e reduzem a diversidade vegetal — em áreas degradadas, predominam apenas 13 espécies dominantes —, comprometendo processos ecológicos como a polinização, realizada majoritariamente por insetos (69,9%), e a dispersão de sementes, dependente de vertebrados (56,9%) (MMA, 2023; Leal et al., 2005). No âmbito socioeconômico, a degradação compromete a renda de cerca de 70% das famílias rurais dependentes da agricultura e da coleta de produtos florestais (Silva et al., 2017). Paralelamente, estigmas culturais, reforçados

por mídias e políticas públicas descontextualizadas, perpetuam a visão de um bioma “pobre” e “improdutivo”, desvalorizando saberes tradicionais e dificultando ações de conservação (Editorarealize, 2016).

3. EDUCAÇÃO AMBIENTAL CONTEXTUALIZADA: FORMAÇÃO E PRÁTICA

3.1. FORMAÇÃO CONTINUADA DE PROFESSORES

A Educação Ambiental (EA) é essencial para enfrentar as ameaças ecológicas e socioculturais que afetam a Caatinga. No Cariri (PB), oficinas ecopedagógicas capacitaram 150 professores, promovendo a integração interdisciplinar entre História, Artes e Ciências, com foco na valorização da biodiversidade local (Abílio et al., 2010). Em Sumé (PB), metodologias participativas, como questionários e estudos do meio, transformaram a percepção de 80 docentes, incorporando a EA como tema transversal nas escolas (Florentino, 2013). Em Campina Grande (PB), um programa desenvolvido em 2022 envolveu 100 professores e resultou em 15 projetos, incluindo hortas comunitárias (Abílio & Silva, 2019). Em Juazeiro (BA), formações com 200 docentes enfatizaram saberes indígenas e a diversidade cultural (Editorarealize, 2022). Já em Petrolina (PE), 150 professores participaram de cursos voltados às mudanças climáticas, originando 10 projetos escolares (Brito, 2023). Todas essas iniciativas, alinhadas aos princípios de Freire (2005), fortalecem a alfabetização climática e incentivam práticas pedagógicas sustentáveis.

3.2. PROJETOS ESCOLARES E INTERDISCIPLINARIDADE

Os projetos escolares têm se mostrado instrumentos eficazes na articulação entre teoria e prática. Em Penaforte (CE), ações de arborização com espécies nativas envolveram 120 alunos, que plantaram 50 mudas e entrevistaram 30 moradores, impactando cerca de 300 pessoas e resgatando saberes étnico-raciais (Pereira et al., 2023). Na Universidade Federal de Sergipe (UFS), o uso de teatro de fantoches e atividades de campo mobilizou 200 estudantes e 50 famílias, integrando saberes freireanos com estudos de solo e clima (UFS, 2018). Em Caldeirão Grande (BA), o projeto “Cidadão Planetário” produziu 150 mudas de cactos, gerando renda para 30 alunas e alinhando-se ao ODS 15 (Jornalismo Caldeirão Grande, 2024). Em Monteiro (PB), ações de recuperação de nascentes envolveram 80 estudantes na proteção de recursos hídricos (Editorarealize, 2022). Em Petrolina (PE), hortas escolares com 60 alunos fortaleceram a segurança alimentar e a aprendizagem ambiental (Editorarealize, 2022). Já em

Alagoas, projetos com o povo indígena Pankararu integraram a EA ao ensino de Ciências, alcançando 100 alunos (UFS, 2018). Em Sousa (PB), o monitoramento de fauna envolveu 50 estudantes na observação de aves, contribuindo com dados para pesquisas locais (Brito, 2023).

3.3. PERCEPÇÃO DOCENTE E DISCENTE

As percepções de professores e alunos refletem os desafios mencionados anteriormente. No Cariri (PB), educadores reconhecem a relevância da biodiversidade, mas apontam a carência de materiais didáticos atualizados como obstáculo à prática pedagógica (Editorarealize, 2016). Em Patos (PB), 70% dos estudantes ainda associam a Caatinga à seca, revelando lacunas no ensino contextualizado (Editorarealize, 2022). Em Petrolina (PE), barreiras culturais persistem e reforçam estereótipos, demandando currículos que integrem saberes locais (Abílio & Silva, 2019). Metodologias ativas, como debates e vivências de campo, têm se mostrado eficazes na elevação da consciência ambiental, especialmente em cursos de especialização (Brito, 2023).

3.4. POLÍTICAS PÚBLICAS E DESAFIOS INSTITUCIONAIS

As ameaças ecológicas da Caatinga exigem políticas públicas mais robustas e integradas. Atualmente, apenas 7% das unidades de conservação do bioma possuem planos de manejo efetivos, e programas como o Bolsa Verde alcançam apenas 5% das áreas prioritárias (MMA, 2023; INPE, 2023). A falta de articulação entre órgãos ambientais e educacionais limita os avanços na conservação. A EA, nesse contexto, pode fortalecer a advocacia comunitária e o protagonismo local, mas demanda investimentos contínuos em formação docente e em currículos regionalizados, conforme defendem Freire (2005) e Viana (2006).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Caatinga, com sua biodiversidade singular e relevantes serviços ecossistêmicos, enfrenta intensa degradação ambiental — com 60 a 70% de sua cobertura alterada e cerca de 15% em processo de desertificação — além de estigmas socioculturais que reforçam percepções negativas sobre o bioma (Leal et al., 2005; Santos et al., 2014). Nesse cenário, a educação ambiental (EA) crítica e transformadora torna-se essencial para promover consciência ecológica, valorização cultural e práticas sustentáveis. Iniciativas como formações

continuadas e projetos escolares já demonstram resultados positivos, mas necessitam ser ampliadas e institucionalizadas.

Propõe-se, portanto, a criação de uma estratégia nacional de EA voltada à Caatinga, estruturada em uma rede intermunicipal que conecte escolas, universidades, ONGs e governos locais. Essa rede deve implementar currículos contextualizados, abordando temas como biodiversidade, mudanças climáticas e saberes tradicionais, além de incentivar ações práticas de reflorestamento com espécies nativas pioneiras, monitoramento da fauna e desenvolvimento de sistemas agrosilvopastoris sustentáveis. Inspirada em Freire (2005) e alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), essa abordagem contribuirá para fortalecer políticas integradas, reduzir vulnerabilidades socioambientais e promover a sustentabilidade e a resiliência das populações que dependem da Caatinga.

REFERÊNCIAS

- ABÍLIO, F. J. P.; FLORENTINO, H. S.; RUFFO, T. L. M. Educação ambiental no bioma Caatinga: formação continuada de professores de escolas públicas de São João do Cariri, Paraíba. *Pesquisa em Educação Ambiental*, v. 5, n. 1, p. 171-193, 2010.
- ABÍLIO, F. J. P.; SILVA, M. A. Ações educativas sobre educação ambiental na formação continuada de professores no semiárido paraibano. Mandacaru: Revista de Ensino de Ciências e Matemática, [S.l.], 2019.
- BRITO, P. R. de. Debatendo o bioma Caatinga: relato de experiência em ensino de ciências da natureza. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Ciências da Natureza) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.
- CASTELLETTI, C. H. M. et al. Quanto ainda resta da Caatinga? Uma estimativa preliminar. In: LEAL, I. R. et al. (Org.). *Ecologia e conservação da Caatinga*. Recife: Editora Universitária UFPE, 2003. p. 91-118.
- EDITORAREALIZE. Bioma Caatinga e a educação ambiental no contexto escolar: uma prática necessária. *Anais do VII CONEDU*, [S.l.], 2022.
- FREIRE, P. *Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa*. São Paulo: Paz e Terra, 2005.
- IBGE. *Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/>. Acesso em: 14 ago. 2025.
- INPE. *Monitoramento da desertificação no semiárido brasileiro*. São José dos Campos: INPE, 2023. Disponível em: <https://www.inpe.br>. Acesso em: 14 ago. 2025.

- LEAL, I. R. et al. (Org.). Ecologia e conservação da Caatinga. Recife: Editora Universitária UFPE, 2003.
- MARENGO, J. A. et al. Climate change and impacts on the Caatinga biome. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, n. 3, p. 291-302, 2017.
- MMA. Biodiversidade na Caatinga: estado de conservação e desafios. Brasília: MMA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma>. Acesso em: 14 ago. 2025.
- PEREIRA, E. V. P. et al. Arborização no meio escolar: a relação da educação ambiental com a cultura étnico-racial no cultivo e preservação de árvores nativas da Caatinga. *Revista Educação Pública*, [S.l.], 2023.

CAPÍTULO IX

DESERTIFICAÇÃO E AGRICULTURA FAMILIAR NO SEMIÁRIDO PARAIBANO: PERCEPÇÕES, DESAFIOS E CAMINHOS PARA A SUSTENTABILIDADE

DESERTIFICATION AND FAMILY FARMING IN THE SEMI-ARID REGION OF PARAÍBA: PERCEPTIONS, CHALLENGES, AND PATHWAYS TO SUSTAINABILITY

DOI: 10.51859/amplla.mas5450-9

Brígida Lima Candeia Moura¹

Denize Monteiro dos Anjos²

Iere Candre Andrade Brito³

José Herculano Filho⁴

Maria Da Guia dos Santos⁵

¹ Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) Campus Patos.

² Doutora em Geografia pela Universidade Federal da Paraíba. Atua nas áreas de Recursos Naturais e Geotecnologias, com experiência em Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto aplicados à análise ambiental, estresse da vegetação e seca agrícola no Semiárido.

³ Engenheiro Agrônomo efetivo da Secretaria Municipal de Agricultura de Patos, atuando como técnico vistoriador em programas sociais voltados à agricultura familiar.

⁴ Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) Campus Patos.

⁵ Graduanda do Curso Superior de Tecnologia em Segurança no Trabalho pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) Campus Patos.

RESUMO

O presente capítulo analisa a relação entre desertificação e agricultura familiar no Semiárido paraibano, com foco no município de Patos-PB. A pesquisa, desenvolvida no âmbito do Edital Interconecta 2025 do Instituto Federal da Paraíba – Campus Patos, teve como objetivo compreender as percepções, desafios e práticas adotadas pelos agricultores familiares diante dos processos de degradação ambiental e escassez hídrica. O estudo adotou abordagem quali-quantitativa, utilizando questionários semiestruturados aplicados a representantes de 22 associações rurais. Os resultados revelaram que a agricultura de subsistência e o cultivo de sequeiro predominam na região, refletindo a forte dependência das chuvas e a limitação de acesso a tecnologias e crédito rural. Constatou-se que apenas 22,7% dos agricultores possuem conhecimento sobre desertificação, embora 86,4% percebam agravamento da degradação ambiental e reconheçam a escassez de água como principal entrave à produção. As principais causas apontadas para a desertificação

incluem as mudanças climáticas, o uso excessivo do solo e o desmatamento. Entre as dificuldades enfrentadas, destacam-se a falta de água, a degradação do solo e a insuficiência da Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER), além da ausência de incentivos governamentais e de recursos financeiros. Conclui-se que o enfrentamento da desertificação e a promoção da sustentabilidade da agricultura familiar exigem políticas públicas integradas, que articulem saberes locais, tecnologias sociais, práticas agroecológicas e apoio técnico contínuo, fortalecendo a resiliência socioambiental das comunidades rurais do Semiárido.

Palavras-chave: Semiárido; desertificação; agricultura familiar; sustentabilidade; políticas públicas.

ABSTRACT

This chapter analyzes the relationship between desertification and family farming in the semi-arid region of Paraíba, focusing on the municipality of



Patos-PB. The research, conducted under the Interconecta 2025 Call of the Federal Institute of Paraíba – Patos Campus, aimed to understand the perceptions, challenges, and practices adopted by family farmers in the face of environmental degradation and water scarcity. The study employed a qualitative and quantitative approach, using semi-structured questionnaires applied to representatives of 22 rural associations. The results showed that subsistence farming and rainfed cultivation predominate in the region, reflecting a strong dependence on rainfall and limited access to technology and rural credit. Only 22.7% of farmers demonstrated knowledge about desertification, although 86.4% perceived worsening environmental degradation and identified water scarcity as the main obstacle to production. The

main causes of desertification reported include climate change, excessive soil use, and deforestation. The main challenges identified were water scarcity, soil degradation, and insufficient Technical Assistance and Rural Extension (ATER), along with the lack of governmental incentives and financial resources. The study concludes that combating desertification and promoting the sustainability of family farming require integrated public policies that combine local knowledge, social technologies, agroecological practices, and continuous technical support, thereby strengthening the socio-environmental resilience of rural communities in Brazil's semi-arid region.

Keywords: Semi-arid region; desertification; family farming; sustainability; public policies.

1. INTRODUÇÃO

O Semiárido brasileiro abrange aproximadamente 969.589 km², distribuídos em 1.133 municípios e com uma população estimada em 28 milhões de habitantes. Situado na região central do Nordeste, esse território se estende pelos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e parte de Minas Gerais, configurando-se como uma das regiões semiáridas mais populosas do mundo (BARROS, 2014).

No estado da Paraíba, destaca-se o município de Patos, localizado no Sertão, que possui uma população estimada em 103.165 habitantes (IBGE, 2022). Seu clima, classificado como semiárido do tipo BSh, caracteriza-se por altas temperaturas ao longo de todo o ano e uma curta estação chuvosa, concentrada entre os meses de fevereiro e abril. A combinação dessas condições resulta em longos períodos de estiagem, impondo limitações à agricultura e exigindo o desenvolvimento de práticas de manejo mais adaptadas à convivência com a irregularidade climática.

Historicamente, a agricultura no Semiárido desenvolveu-se sob forte pressão da escassez hídrica. Inicialmente estruturada na pecuária extensiva e, posteriormente, na produção de alimentos básicos como milho, feijão e mandioca, essa atividade foi fundamental para a subsistência das famílias rurais. Entretanto, práticas como o desmatamento, as queimadas e o sobrepastoreio contribuíram para a degradação dos solos, intensificando processos erosivos e favorecendo o avanço da desertificação.

A desertificação, definida como a degradação de terras em áreas áridas, semiáridas e subúmidas, resulta da interação entre fatores climáticos adversos e atividades humanas

insustentáveis. Seus impactos vão além da dimensão ecológica: comprometem a fertilidade dos solos, reduzem a biodiversidade, fragilizam a produção agrícola e ampliam a vulnerabilidade socioeconômica das comunidades rurais (SANTOS, 2011; SILVA et al., 2010).

No Semiárido paraibano, os agricultores familiares estão entre os grupos mais diretamente afetados por esse processo. A redução da produtividade, a queda na renda e a insegurança alimentar emergem como consequências imediatas, ao mesmo tempo em que se intensificam desafios estruturais, como a ausência de políticas públicas efetivas e a limitação de alternativas tecnológicas acessíveis. Nesse contexto, compreender a percepção dos agricultores sobre a desertificação em Patos-PB torna-se essencial não apenas para dimensionar o problema em sua complexidade, mas também para subsidiar políticas de enfrentamento, fortalecer a resiliência comunitária e fomentar estratégias de manejo sustentável capazes de conciliar produção agrícola, conservação ambiental e justiça socioambiental.

Este capítulo apresenta resultados de uma pesquisa desenvolvida no âmbito do Edital Interconecta 2025, do Instituto Federal da Paraíba *Campus* Patos, que buscou analisar a percepção dos agricultores familiares acerca da desertificação e do uso dos recursos naturais no município

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Semiárido brasileiro é marcado por condições naturais adversas que, somadas a fatores socioeconômicos, tornam a região uma das mais vulneráveis do país. A agricultura predominante ainda é a de sequeiro, realizada com baixo nível tecnológico e alta dependência dos recursos naturais, o que intensifica os riscos de degradação ambiental e compromete a resiliência das comunidades rurais (ANGELOTTI et al., 2011).

Nesse contexto, a desertificação constitui um dos processos mais críticos. De acordo com a Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação, trata-se de um fenômeno resultante da interação entre fatores climáticos e práticas humanas insustentáveis, como desmatamento, sobrepastoreio, queimadas e manejo inadequado do solo e da água. Estudos clássicos apontam que a desertificação é um processo multifatorial, abrangendo dimensões sociais, econômicas, biológicas e físicas, o que a torna um desafio complexo de ser enfrentado (MÉREGA, 2003; SAMPAIO et al., 2003).

Os impactos desse processo se refletem diretamente na produção agrícola e, consequentemente, na economia nacional. Cerri e Cerri (2007) destacam que a degradação dos solos compromete a produtividade, com reflexos no Produto Interno Bruto agrícola brasileiro. Para Deconto (2008), a ausência de medidas de mitigação diante das mudanças climáticas tende a agravar ainda mais esse cenário, sobretudo no Semiárido, onde a irregularidade das chuvas e as estiagens prolongadas já são marcantes.

Diante desses desafios, a agricultura familiar assume papel estratégico. No Nordeste, ela é a principal forma de produção agrícola, combinando práticas tradicionais adaptadas às condições do Semiárido com inovações voltadas à sustentabilidade. Técnicas como rotação de culturas, consórcio de plantas e uso de adubação orgânica contribuem para a preservação da fertilidade do solo, favorecem o uso eficiente da água e reduzem a dependência de insumos externos (SILVA et al., 2020).

Além dos aspectos técnicos, o conhecimento local dos agricultores familiares tem relevância central. Esses sujeitos sociais reconhecem sinais de degradação e desenvolvem estratégias próprias de adaptação, que dialogam com práticas de convivência com o Semiárido (SANTOS, 2019). Quando articulados a tecnologias modernas – como sistemas simplificados de irrigação e cultivares resistentes à seca – tais saberes fortalecem a resiliência produtiva e reduzem a vulnerabilidade socioambiental (OLIVEIRA, 2016).

Assim, o enfrentamento da desertificação no Semiárido brasileiro requer uma abordagem integrada, que una ciência e saberes tradicionais, técnicas agroecológicas e políticas públicas consistentes. É por meio dessa articulação que será possível garantir o manejo sustentável dos recursos naturais, assegurar a permanência das famílias no campo e promover justiça socioambiental em territórios historicamente marcados pela vulnerabilidade.

A pesquisa, de caráter descritivo e exploratório com abordagem quali-quantitativa, foi realizada no município de Patos-PB, no Semiárido brasileiro, com agricultores familiares vinculados a 22 associações rurais. O estudo buscou compreender percepções, práticas de manejo e desafios relacionados à desertificação e degradação ambiental. A coleta de dados ocorreu entre julho e setembro de 2025, por meio de questionário semiestruturado com questões fechadas e abertas sobre conhecimento, causas e impactos da degradação, escassez hídrica, erosão do solo, ações de combate e práticas sustentáveis. Os dados quantitativos foram tratados no Microsoft Excel, com análise descritiva de frequências, enquanto as respostas abertas foram examinadas por análise de conteúdo temática. Os resultados foram

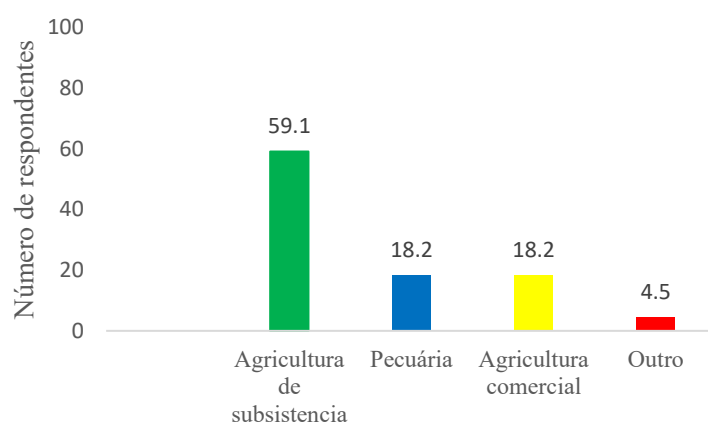
interpretados de forma integrada ao referencial teórico, articulando percepções locais e literatura científica. A pesquisa respeitou os princípios éticos, garantindo anonimato, confidencialidade e participação voluntária mediante consentimento livre e esclarecido.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. ATIVIDADES PRODUTIVAS E MANEJO AGRÍCOLA

Os resultados indicam que a agricultura de subsistência constitui a principal atividade desenvolvida pelos agricultores familiares (59,1%), seguida pela pecuária e pela agricultura comercial (ambas com 18,2%) e, em menor proporção, por outras atividades (4,5%) (Figura 1). Esses dados evidenciam o caráter de autoconsumo predominante na produção agrícola do Semiárido paraibano, voltado à segurança alimentar das famílias. Tal cenário decorre de fatores estruturais, como a limitação de acesso a crédito, tecnologia e infraestrutura, além da forte dependência das condições climáticas adversas. Ainda assim, a presença de agricultores que conciliam pecuária e agricultura comercial reflete estratégias de diversificação produtiva que contribuem para reduzir a vulnerabilidade socioeconômica e fortalecer a resiliência local (MARENGO, 2021).

Figura 1- Principal atividade agrícola dos agricultores familiares.



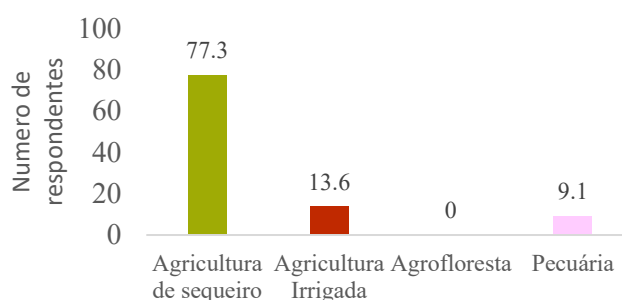
Fonte: Autoria própria.

Em relação às práticas produtivas, verificou-se a predominância da agricultura de sequeiro (77,3%), seguida da irrigada (13,6%) e da pecuária (9,1%), sem registro de uso de sistemas agroflorestais (Figura 2). A forte dependência das chuvas evidencia a vulnerabilidade do sistema produtivo frente às mudanças climáticas e à desertificação, enquanto o baixo uso da irrigação reflete a escassez de tecnologias hídricas e investimentos públicos. A ausência de

agroflorestas é um dado preocupante, considerando seu potencial para promover sustentabilidade ambiental, diversificação econômica e conservação do solo (ALTIERI, 2012).

Dessa forma, os resultados reforçam a necessidade de políticas públicas e ações de extensão voltadas à diversificação produtiva, à ampliação do acesso à irrigação e ao estímulo de práticas agroecológicas e agroflorestais, como estratégias essenciais para o fortalecimento da resiliência socioambiental das comunidades rurais do Semiárido.

Figura 2 - Práticas agrícolas predominantes declaradas pelos agricultores familiares.

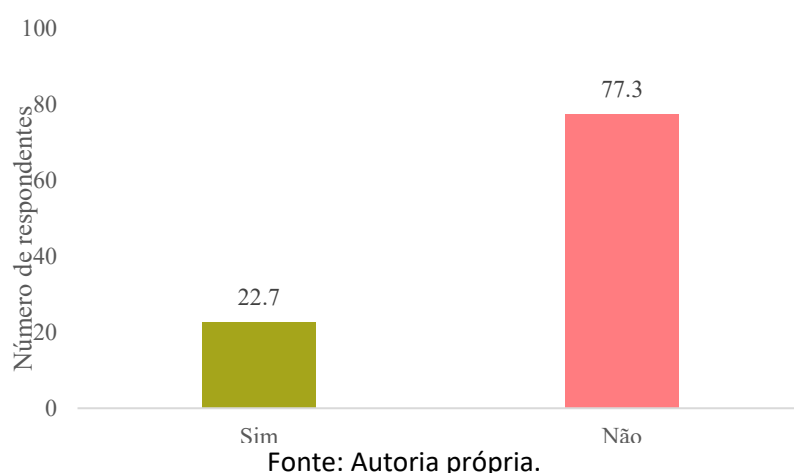


Fonte: Autoria própria.

3.2. PERCEPÇÃO SOBRE DESERTIFICAÇÃO, DEGRADAÇÃO AMBIENTAL E ESCASSEZ HÍDRICA

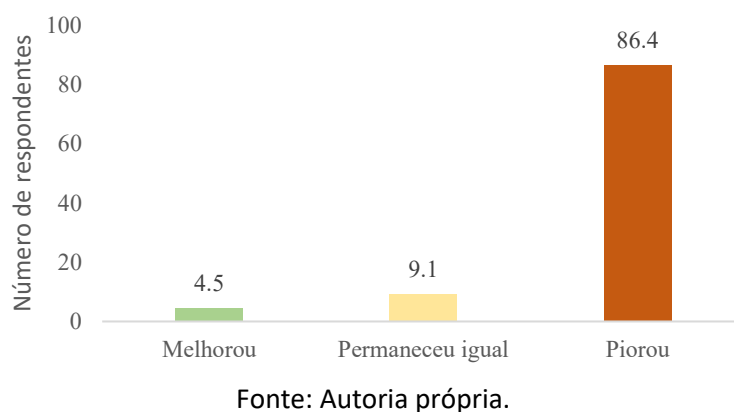
Os resultados revelam que apenas 22,7% dos agricultores familiares afirmaram ter conhecimento sobre o processo de desertificação, enquanto 77,3% declararam não possuir informações sobre o tema (Figura 3). Esse dado é preocupante, considerando que o município estudado se insere em área vulnerável à desertificação, marcada por longos períodos de estiagem e uso intensivo dos recursos naturais. A falta de conhecimento dificulta a adoção de estratégias de prevenção e mitigação, ampliando a vulnerabilidade socioambiental das comunidades rurais (SOUSA et al., 2011; NUNES et al., 2016). Por outro lado, a minoria que reconhece o problema reforça a importância de ações de educação ambiental crítica e contextualizada, capazes de transformar informação em prática social e fortalecer a resiliência comunitária frente às mudanças climáticas (SOUZA, 2023).

Figura 3- Conhecimento dos agricultores familiares sobre o processo de desertificação.



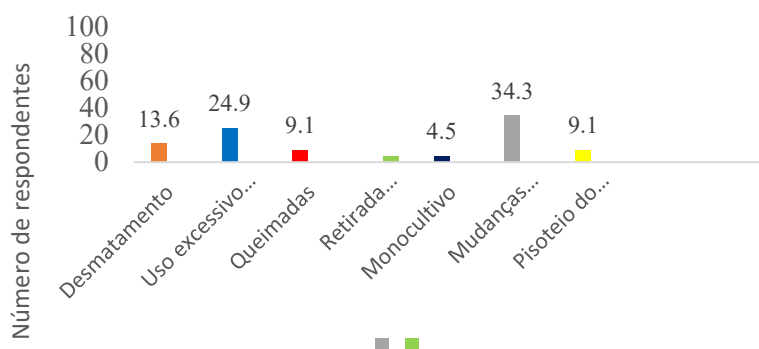
Quanto à percepção sobre a degradação ambiental, a grande maioria (86,4%) considera que a situação piorou nos últimos anos, enquanto 9,1% avaliam que permaneceu igual e apenas 4,5% acreditam que houve melhora (Figura 4). Essa percepção de agravamento reflete os efeitos visíveis das mudanças climáticas, da escassez hídrica e das práticas agrícolas insustentáveis, revelando a gravidade da vulnerabilidade ambiental e a ausência de políticas públicas eficazes de combate à desertificação.

Figura 4- Percepção dos agricultores familiares sobre a evolução da degradação ambiental



Em relação às principais causas da desertificação, os agricultores destacaram as mudanças climáticas (34,3%) como fator mais relevante, seguidas pelo uso excessivo do solo (24,9%) e pelo desmatamento (13,6%) (Figura 5). Também foram citadas queimadas, pisoteio do gado, monocultivo e retirada da vegetação. Essa percepção combina a consciência dos efeitos globais do clima com o reconhecimento de práticas locais de degradação, reforçando a necessidade de políticas integradas de agroecologia, reflorestamento e manejo sustentável do solo (EMBRAPA, 2014; NETO et al., 2021).

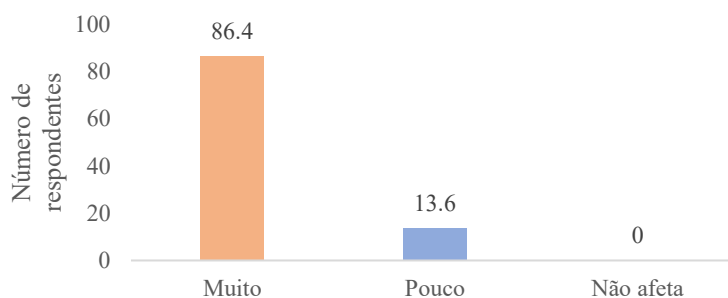
Figura 5- Percepção dos agricultores familiares sobre as causas da desertificação.



Fonte: Autoria própria.

Por fim, quanto ao impacto da escassez de água, 86,4% dos agricultores afirmaram que a falta de água afeta fortemente a produção agrícola (Figura 6). A percepção unânime sobre a influência da escassez hídrica evidencia a centralidade do acesso à água na agricultura de subsistência e a necessidade de ampliar tecnologias sociais de convivência com o Semiárido, como cisternas, barragens subterrâneas e irrigação simplificada (SANTANA, 2011; GOMES et al., 2016). Estudos recentes mostram que, embora existam avanços, a descontinuidade e a centralização das políticas públicas fragilizam os resultados, comprometendo a sustentabilidade da produção familiar (NOGUEIRA; MILHORANCE; MENDES, 2020).

Figura 6- Percepção dos agricultores familiares sobre o impacto da escassez de água na produção agrícola.



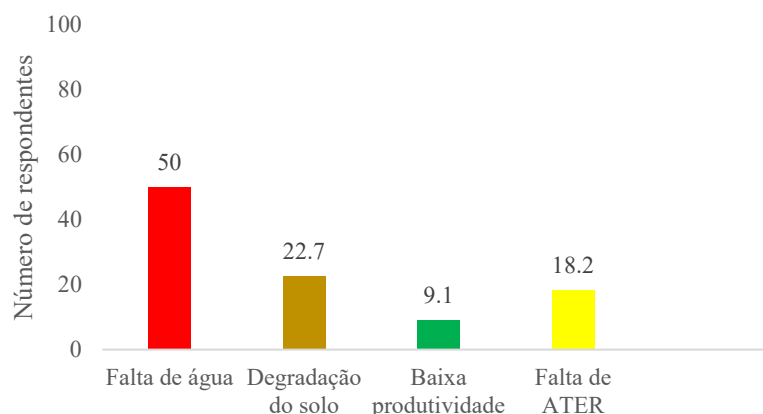
Fonte: Autoria própria

3.3. PRINCIPAIS DIFICULDADES E LACUNAS DE APOIO GOVERNAMENTAL

Os resultados indicam que a falta de água é a principal dificuldade enfrentada pelos agricultores familiares (50%), seguida pela degradação do solo (22,7%), pela insuficiência da Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER) (18,2%) e pela baixa produtividade (9,1%) (Figura 7). A centralidade da escassez hídrica reforça a vulnerabilidade socioambiental das comunidades rurais do Semiárido, apontada por Malvezzi (2007) como um dos maiores

entraves ao desenvolvimento regional. A degradação do solo agrava esse cenário, comprometendo a resiliência produtiva e ampliando os riscos de desertificação

Figura 7- Principais dificuldades enfrentadas pelos agricultores familiares.

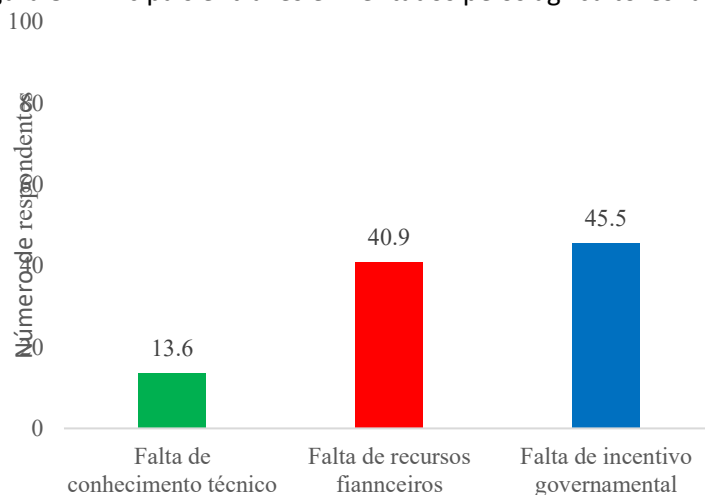


Fonte: Autoria própria.

A crítica à insuficiência da ATER evidencia a necessidade de reformulação das políticas de assistência técnica, com maior integração aos saberes locais e às especificidades do território (CAPORAL; COSTABEBER, 2004). Assim, as dificuldades relatadas pelos agricultores se interligam: a escassez hídrica e a degradação ambiental reduzem a produtividade, enquanto o apoio institucional limitado restringe a adoção de práticas sustentáveis e inovadoras.

Verificou-se que os principais entraves à sustentabilidade da agricultura familiar são a falta de incentivo governamental (45,5%) e a escassez de recursos financeiros (40,9%), seguidos pela carência de conhecimento técnico (13,6%) (Figura 8). Esses dados confirmam que a ausência de apoio institucional é um fator determinante da vulnerabilidade das famílias agricultoras no Semiárido (AGUIAR et al., 2019; SANTANA, 2022).

Figura 8- Principais entraves enfrentados pelos agricultores familiares.



Fonte: Elaboração própria (2025)

A limitação de recursos financeiros restringe a adoção de tecnologias de irrigação eficiente e de práticas de recuperação do solo, ainda pouco presentes na região. Embora o crédito rural do Pronaf contribua para o aumento da produção, seu alcance ainda é desigual (DIAS; GOMES; PEREIRA, 2023). A baixa capacitação técnica, por sua vez, reforça a necessidade de ampliar e qualificar a ATER, considerando que sua atuação contínua e adaptada ao contexto local pode elevar a produtividade e a renda dos agricultores.

Em síntese, os desafios enfrentados pelos agricultores ultrapassam a dimensão produtiva, refletindo problemas estruturais e institucionais que exigem políticas integradas de crédito, capacitação e apoio técnico para fortalecer a agricultura familiar como pilar de desenvolvimento sustentável no Semiárido.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa em Patos-PB revelou que os agricultores familiares enfrentam graves desafios decorrentes da desertificação e da degradação ambiental. A agricultura de subsistência e o cultivo de sequeiro predominam, tornando as famílias dependentes das chuvas e vulneráveis às mudanças climáticas. A maioria dos agricultores (77,3%) desconhece o processo de desertificação, evidenciando a necessidade de ações de educação ambiental e extensão rural.

Os principais entraves identificados são a escassez hídrica, a degradação dos solos e a insuficiência da assistência técnica e de políticas públicas de incentivo. Esses fatores

perpetuam um ciclo de vulnerabilidade socioeconômica que dificulta a adoção de práticas sustentáveis.

O estudo destaca a urgência de políticas públicas integradas, que valorizem os saberes locais e promovam o uso racional dos recursos naturais por meio da articulação entre ciência, tecnologias sociais e conhecimento tradicional. Conclui-se que apenas a cooperação entre poder público, instituições e agricultores poderá fortalecer a resiliência das comunidades rurais e garantir a sustentabilidade da agricultura familiar no Semiárido paraibano.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB) *Campus Patos* pelo apoio institucional e pela disponibilização do transporte utilizado nas visitas às comunidades rurais. Agradecem, também, à Secretaria Municipal de Agricultura de Patos-PB pela colaboração na articulação com as comunidades e pelo acompanhamento nas atividades de campo, o que foi fundamental para o desenvolvimento da pesquisa.

De forma especial, expressam gratidão aos agricultores e agricultoras familiares das associações rurais do município, que compartilharam seus conhecimentos, experiências e percepções, contribuindo de maneira essencial para a construção deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, L. C.; DEL GROSSI, M.; OLIVEIRA, L. G.; ÁVILA, M. L. **As políticas públicas no semiárido brasileiro: uma revisão de literatura**. *Revista Econômica do Nordeste*, v. 50, n. 2, p. 9–22, 2019.
- ALTIERI, M. A. *Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável*. 3. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2012.
- ANGELOTTI, F.; FERNANDES JÚNIOR, P. I.; SÁ, I. B. de. **Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro: Medidas de Mitigação e Adaptação**. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 06, p. 1097-1111, 2011.
- BARROS, J. D. de S. **Estoques de carbono e nitrogênio em vertissolo e condições socioeconômicas e ambientais na microbacia hidrográfica do Riacho Val Paraíso (PB)**. 2014. 152 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2014.
- CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia: conceitos, princípios e estratégias**. Brasília: MDA/SAF/DATER-IICA, 2004.

- CERRI, C.C.; CERRI, PELLEGRINE, C.E. **Agricultura e aquecimento global**. Boletim Informativo da SBCS, v.23, p.40-44, 2007.
- DECONTO, J.G. **Aquecimento global e anova geografia da produção agrícola no Brasil**. Embrapa Informática Agropecuária -Unicamp, Campinas, 2008.
- DIAS, T. K. M.; GOMES, B. M.; PEREIRA, R. S. **Crédito rural e produção das lavouras temporárias nos estados do Nordeste**. *Revista de Economia e Sociologia Rural (RESR)*, 2023.
- EMBRAPA. **Processos de desertificação no Semiárido brasileiro**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2014. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/861927/1/ID43498.pdf>. Acesso em: 17 set. 2025.
- GOMES, U. A. F. et al. **Acesso à água proporcionado pelo Programa de cisternas de placas no Semiárido brasileiro: avaliação de impactos sociais e ambientais**. *Estudos Sociedade e Agricultura*, v. 24, n. 2, p. 414-440, 2016. DOI: 10.1590/1234-56781806-94790540205. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/4BS7RNWWrPRkkzv7zgLxZ7F/>. Acesso em: 17 set. 2025.
- MALVEZZI, R. **Semi-árido: uma visão holística**. Brasília: Confea, 2007.
- MARENGO, José A. **Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options**. *Climate Resilience and Sustainability*, v. 1, n. 1, e17, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/cli2.17>.
- MÉREGA, J.L. **El Problema de la Desertificación**. In: **Desertificación y Sociedad Civil**. Argentina: Fundación Del Sur, 2003.
- NETO, J. F. da C.; LIMA, E. R. V.; SANTOS, J. F. S.; LIMA, V. M. S. **Desertificação: uma visão geral dos processos e conceitos**. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 3, p. e19910313166, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i3.13166. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/19950>. Acesso em: 17 set. 2025.
- NOGUEIRA, D.; MILHORANCE, C.; MENDES, P. **Do Programa Um Milhão de Cisternas ao Água para Todos: divergências políticas e bricolagem institucional na promoção do acesso à água no Semiárido brasileiro**. *IdeAs – Idées d'Amériques*, n. 16, 2020. DOI: 10.4000/ideas.7219. Disponível em: <https://journals.openedition.org/ideas/7219?lang=pt>. Acesso em: 17 set. 2025.
- NUNES, A. J. C. et al. **Percepção ambiental dos agricultores familiares e o uso dos recursos naturais do município de São Domingos – Semiárido baiano**. *Polêmica*, v. 15, n. 4, p. 1-15, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/307952788_Percepcao_Ambiental_dos_Agricultores_Familiares_e_o_Uso_dos_Recursos_Naturais_do_Municipio_de_Sao_Domingos_-_Semiario_Baiano. Acesso em: 16 set. 2025.

- OLIVEIRA, R. (2016). **Inovações Tecnológicas na Agricultura Familiar: Uma Abordagem para a Sustentabilidade**. Tese de Doutorado, Universidade de Patos, PB.
- SAMPAIO, E. V.de S.B.et al. **Desertificação no Brasil: Conceitos, Núcleos e Tecnologias de Recuperação e Convivência**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2003.
- SANTANA, A. A. M. F. **Agricultura familiar no semiárido: vulnerabilidades e estratégias de resistência**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Rural) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022
- SANTANA, V. L. **A experiência do Programa Cisternas no semiárido brasileiro**. In: IPEA (org.). *Texto para Discussão 1643*. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2011. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/code2011/chamada2011/pdf/area7/area7-artigo34.pdf>. Acesso em: 17 set. 2025.
- SANTANA, A. A. M. F. **Agricultura familiar no semiárido: vulnerabilidades e estratégias de resistência**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Rural) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.
- SANTOS, J. M. dos. **Estratégias de convivência para a conservação dos recursos naturais e mitigação dos efeitos da desertificação no Semiárido**. In: LIMA, R. da C. C.; CAVALCANTE, A. de M. B.; MARIN, A. M. P. (Orgs). *Desertificação e mudanças climáticas no semiárido brasileiro*. Campina Grande: INSA-PB, 2011. p. 163-184.
- SANTOS, M. (2019). **Percepção dos Agricultores sobre a Gestão dos Recursos Naturais em Regiões Semiáridas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba.
- SILVA, J., et al. (2020). **Agricultura Familiar e Sustentabilidade: Desafios e Perspectivas**. *Revista Brasileira de Agroecologia*, 15(2), 45-60.
- SOUSA, J. A. C.; SANTOS, A. C. L.; GOMES, A. F. **Desertificação e degradação ambiental: percepção dos agricultores no município de Cachoeira dos Índios/PB**. *Polêmica*, v. 10, n. 1, p. 1-14, 2011. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/polemica/article/view/3096/2217>. Acesso em: 16 set. 2025.
- SOUZA, S. D. G. **A desertificação nas pesquisas de degradação ambiental no Semiárido brasileiro: uma revisão sistemática integrativa da literatura**. 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/373419047>. Acesso em: 16 set. 2025.

CAPÍTULO X

TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA APLICADA NA INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FACHADAS

INFRARED THERMOGRAPHY APPLIED TO FACADE INSPECTION AND DIAGNOSIS

DOI: 10.51859/ampla.mas5450-10

Aureliano Amaro Ribeiro Souza de Macedo ¹

Elisama Florentino de Lima ²

Maria Alice Laureano de Sá ²

Karina Alves dos Santos Lima ²

Ana Clara Pereira dos Santos ²

Gilvan José Venceslau ²

Rômulo Pereira da Silva ³

Eliana Cristina Barreto Monteiro ⁴

¹ Graduado na Universidade Católica de Pernambuco e Universidade de Pernambuco.

² Graduando na Universidade Católica de Pernambuco e Universidade de Pernambuco.

³ Mestrando em Modelagem, Inovação e Sustentabilidade. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais – Universidade Católica de Pernambuco e Universidade de Pernambuco.

⁴ Professora Adjunta da Universidade Católica de Pernambuco e Universidade de Pernambuco.

RESUMO

A termografia infravermelha é uma técnica não destrutiva com grande potencial para inspeção e diagnóstico de fachadas, permitindo identificar anomalias invisíveis à análise visual e aumentando a precisão das avaliações. Baseada na captação da radiação térmica emitida pelos materiais, possibilita detectar infiltrações, falhas estruturais, ilhas de calor e desuniformidades sem causar danos à edificação. Além de reduzir custos e tempo de manutenção, favorece a elaboração de planejamentos mais assertivos.

O estudo aborda os princípios teóricos da termografia, suas aplicações práticas, metodologias de inspeção e interpretação de imagens térmicas, destacando normas que garantem a confiabilidade dos resultados, como a ABNT NBR 16818:2020 e a ISO 6781-3:2015. Também evidencia os avanços tecnológicos que associam o uso de VANTs (drones) e softwares de análise térmica.

Embora apresente limitações relacionadas às condições ambientais e à necessidade de profissionais qualificados, a técnica mostra perspectivas promissoras quando integrada a tecnologias digitais como o BIM e redes neurais artificiais, ampliando seu potencial de automatização e consolidando-se como uma ferramenta essencial para a gestão e conservação de edificações e fachadas.

Palavras-chave: Termografia, Inspeção, Diagnóstico, Fachadas, Manutenção.

ABSTRACT

Infrared thermography is a non-destructive technique with great potential for facade inspection and diagnosis, enabling the identification of anomalies invisible to visual analysis and increasing the accuracy of assessments. Based on capturing the thermal radiation emitted by materials, it detects infiltrations, structural failures, heat islands, and irregularities without causing damage to the building. It also reduces maintenance time and costs, allowing for more effective planning.

The study presents the theoretical principles of thermography, its practical applications, inspection methodologies, and thermal image interpretation, emphasizing standards that ensure result reliability, such as ABNT NBR 16818:2020 and ISO 6781-3:2015. It also highlights technological advances that combine UAVs (drones) and thermal analysis software.

Despite limitations related to environmental conditions and the need for skilled professionals, thermography shows promising prospects when integrated with digital technologies such as BIM and artificial neural networks, enhancing automation potential and establishing itself as an essential tool for building and facade management and conservation.

Keywords: Thermography, Inspection, Diagnosis, Facades, Maintenance.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil está em constante evolução, incorporando novas tecnologias que melhoram a eficiência e a segurança nas práticas construtivas. Apesar de todo esse avanço é inevitável a ocorrência de patologias nas edificações, tornando essencial o uso de técnicas inovadoras para sua detecção e diagnóstico. Dependendo do grau ou estado de deterioração da edificação, os ensaios não destrutivos possuem técnicas ágeis e limpas combinando análises visuais e uso de equipamentos que permitem a identificação de problemas ocultos, como infiltrações, problemas de projeto, execução e técnicas de construção, descolamentos de revestimento, entre outros, sem causar danos à estrutura (Alvarenga *et al.*, 2023). Porém, como todas as técnicas, possui uma certa limitação em relação ao local analisado, o horário a ser realizada a avaliação do dano, ocorrência de chuva no momento da inspeção e conhecimento técnico para interpretação correta dos resultados.

A termografia infravermelha é um método não destrutivo que utiliza a radiação infravermelha através de câmeras térmicas para detecção fissuras, infiltrações, e outras patologias em diversas peças construtivas. Esses equipamentos podem ser portáteis para inspeções em proximidade ou sistemas embarcados em VANTs elevando a possibilidade de inspeções em fachadas de difícil acesso. Essa técnica é capaz de distinguir pequenas diferenças de temperatura em uma fachada. Cada elemento construtivo possui uma densidade e uma capacidade de retenção de calor. Com a termografia, um local onde essa uniformidade na estrutura é descontinuada ou variável pode ser um indicativo de uma patologia. Importante sempre associar mais de uma forma de inspeção e diagnóstico para tornar a análise mais assertiva e identificando problemas antes de tornarem-se críticos.

Diante da frequente necessidade de manutenção das edificações é essencial durante toda a vida útil da construção, sejam elas edifícios ou residências, novos ou antigos, populares ou luxuosos, histórico ou contemporâneo. Porém muitas vezes esse serviço não é realizado ou é muito negligenciado, levando a sérios problemas estruturais que poderiam ter sido evitados ou resolvidos logo no início de sua apresentação. Para tanto existem técnicas de inspeção e diagnóstico não destrutivos muito eficazes para identificar diversos problemas. A termografia infravermelha, por sua capacidade de detectar patologias ocultas é uma ferramenta valiosa para a manutenção preventiva e corretiva de fachadas em edificações (Altoé & Filho, 2012).

Além disso a termografia complementa a análise visual ao permitir a identificação de problemas que não são visíveis a olho nu, reduzindo tempo e custo para realização do serviço e aumentando a precisão na avaliação das patologias existentes (Takeda & Mazer, 2018). Além da identificação de patologias a termografia infravermelha auxilia na auditoria energética, avaliando o desempenho térmico de edifícios.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. FUNDAMENTOS DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A termografia infravermelha é uma técnica que registra a intensidade da radiação infravermelha, não perceptível a olho nu, emitida pela superfície dos materiais, convertendo-a em sinais elétricos. Por meio de softwares específicos, esses sinais são transformados em imagens térmicas, permitindo a visualização e a análise detalhada do comportamento térmico do elemento avaliado (Juliani, 2019). De maneira análoga, vale salientar que a termografia infravermelha é um método de ensaio não destrutivo que permite identificar possíveis patologias nas edificações sem causar danos à estrutura. Trata-se de um procedimento baseado na detecção da radiação infravermelha emitida pelos materiais, possibilitando observar o fluxo e a transmissão de calor. Dessa forma, torna-se viável localizar anomalias que se manifestam nas construções, contribuindo para um diagnóstico preciso do desempenho dos elementos avaliados (Amaral *et al.*, 2016).

A detecção da temperatura ocorre por meio das cores emitidas pela radiação. Observa-se que a temperatura aumenta gradualmente à medida que o espectro visível se desloca do violeta para o vermelho. Entretanto, estudos demonstraram que as temperaturas mais elevadas se situam além da faixa correspondente ao vermelho, ou seja, em uma região do espectro eletromagnético não visível ao olho humano. A câmera termográfica, por sua vez, capta essas radiações, converte-as em sinais eletrônicos e gera imagens denominadas termogramas, nas quais diferentes cores representam distintas faixas de temperatura (Mendonça; Amaral; Catarino, 2010)

Segundo Santos, Rocha e Póvoas (2019), a termografia infravermelha possibilita identificar anomalias internas, como infiltrações, a partir da análise de contrastes térmicos na superfície dos materiais. A presença de materiais impermeáveis pode influenciar esses contrastes, permitindo que irregularidades sejam detectadas ainda nas fases iniciais do projeto. Ao registrar diferenças de temperatura, a técnica evidencia problemas ocultos, como

falhas de revestimento, umidade ou descolamentos, sem a necessidade de intervenções destrutivas na fachada.

2.2. HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DA TERMOGRAFIA NA ENGENHARIA CIVIL

O campo de aplicação da termografia vem se consolidando progressivamente em diversas áreas do conhecimento. Em nível mundial, essa técnica é amplamente empregada em setores militares, para detecção de pessoas; na medicina, para o diagnóstico de doenças que provocam alterações na circulação sanguínea; e em sistemas elétricos e edificações, para identificar infiltrações de ar quente em ambientes climatizados. No Brasil, a termografia é bastante utilizada por empresas de geração e distribuição de energia elétrica. Além disso, sua aplicação em edificações permite identificar umidade ainda em estágio inicial, antes mesmo que seja perceptível a olho nu. (Silva, 2007).

De acordo com Juliani (2019), a utilização da termografia infravermelha em inspeções de revestimentos e estruturas apresenta grande potencial para reduzir o tempo e o custo das avaliações. No entanto, a técnica ainda é pouco divulgada e utilizada entre os profissionais da engenharia civil no Brasil. De forma semelhante, Oliveira *et al.* (2023) destacam que a termografia é eficiente na detecção de umidade e falhas de impermeabilização, embora sua efetividade dependa diretamente das condições ambientais e dos procedimentos de medição adotados. Portanto, o avanço da técnica no contexto nacional também exige o amadurecimento metodológico e a capacitação dos profissionais que a utilizam.

No cenário brasileiro, os pesquisadores têm observado que a adoção da termografia ainda enfrenta desafios significativos, tais como a falta de normatização, a carência de treinamento adequado de operadores e a integração insuficiente com outros métodos de ensaios não destrutivos. Santos, Rocha e Póvoas (2019) indicam que, apesar da eficácia da termografia para detectar infiltrações, a sua precisão pode ser comprometida por fatores como a variação da emissividade dos materiais e a incidência de radiação solar, o que requer cuidados metodológicos específicos. Assim, embora a técnica tenha evoluído de modo expressivo no Brasil, seu uso plenamente institucionalizado na engenharia civil ainda demanda o desenvolvimento de protocolos padronizados, formação técnica especializada e alinhamento normativo consistente.

2.3. APLICAÇÕES PRÁTICAS NA INSPEÇÃO DE FACHADAS

A termografia tem se consolidado como uma das principais técnicas não destrutivas empregadas na engenharia de edificações, sobretudo na inspeção e diagnóstico de fachadas. Essa metodologia baseia-se na captação da radiação térmica emitida pelos materiais, permitindo a visualização das variações de temperatura na superfície das estruturas. Por meio dessa tecnologia, é possível identificar anomalias térmicas que podem estar relacionadas a patologias construtivas, como descolamentos, infiltrações, fissuras e falhas de isolamento térmico. Segundo Maldague (2001), a termografia infravermelha é uma ferramenta eficaz para a detecção precoce de defeitos ocultos, uma vez que as variações térmicas superficiais revelam irregularidades internas dos materiais.

No contexto das fachadas, a termografia se destaca por sua capacidade de detecção de delaminações e descolamentos de revestimentos. Diferenças de condutividade e comportamento térmico entre áreas aderidas e destacadas provocam contrastes visuais nos termogramas, possibilitando o mapeamento de regiões com risco de desprendimento. Freitas, Carasek e Cascudo (2014) demonstraram, em estudo experimental, que essa técnica é eficiente na identificação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura, contribuindo para um diagnóstico mais rápido e preciso das anomalias superficiais.

Outra aplicação amplamente relatada é a detecção de umidade. A presença de água altera as propriedades térmicas dos materiais, criando padrões de temperatura distintos que podem ser identificados pela câmera termográfica. Essa característica torna a termografia uma ferramenta valiosa na inspeção de infiltrações e na avaliação da integridade de sistemas de impermeabilização. Além disso, em fachadas com sistemas de isolamento térmico, a termografia permite visualizar pontes térmicas e falhas na continuidade do isolamento, favorecendo intervenções mais direcionadas e eficazes. De acordo com Balaras e Argiriou (2002), a umidade influencia significativamente o comportamento térmico das superfícies, sendo facilmente detectável por meio da análise termográfica, o que torna essa técnica indispensável para o diagnóstico de anomalias relacionadas à água em edificações.

Nos últimos anos, a integração da termografia com tecnologias emergentes, como veículos aéreos não tripulados (VANTS), tem ampliado seu campo de aplicação. O uso de drones equipados com câmeras térmicas possibilita a inspeção de fachadas de edifícios altos ou de difícil acesso, de forma segura e ágil, sem a necessidade de andaimes ou plataformas suspensas. Resende *et al.* (2022) aplicaram essa metodologia em um estudo de caso no

Mercado Municipal de São Paulo, demonstrando que a técnica é eficiente tanto para o diagnóstico de patologias quanto para o planejamento de intervenções em edificações históricas.

Apesar de suas vantagens, a termografia apresenta algumas limitações que precisam ser consideradas. O método depende fortemente das condições ambientais, como radiação solar, vento e variação térmica entre a superfície e o ambiente. Inspeções realizadas sob condições inadequadas podem gerar interpretações equivocadas. Além disso, a emissividade dos materiais deve ser corretamente ajustada, pois variações nesse parâmetro podem alterar as leituras de temperatura. Por esses motivos, recomenda-se que a termografia seja utilizada de forma complementar a outros métodos de inspeção, como a análise visual, ensaios de percussão e medições de umidade. Conforme Meola e Carlomagno (2004), fatores ambientais e propriedades superficiais dos materiais exercem grande influência nos resultados termográficos, sendo essencial o controle das condições de medição e a calibração adequada dos equipamentos para garantir a confiabilidade dos diagnósticos.

Estudos recentes também têm apontado avanços significativos na aplicação da termografia ativa e no uso de algoritmos de processamento de imagem, capazes de aprimorar a sensibilidade da técnica e reduzir interferências externas (TOMITA *et al.*, 2022). Essas inovações, associadas à integração da termografia com modelos tridimensionais e sistemas BIM, fortalecem o uso da tecnologia como ferramenta de apoio à manutenção preditiva e à gestão de ativos na construção civil.

2.4. METODOLOGIAS DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA

As metodologias de inspeção termográfica utilizam câmeras infravermelhas para detectar variações de temperatura, convertendo a energia térmica invisível em imagens chamadas termogramas.

As metodologias de inspeção termográfica utilizam câmeras infravermelhas para detectar variações de temperatura, convertendo a energia térmica invisível em imagens denominadas termogramas. Essa técnica é não destrutiva, não invasiva e amplamente aplicada na manutenção preditiva e diagnóstica em diferentes áreas da engenharia, como elétrica, mecânica e civil.

2.4.1. Etapas da Inspeção Termográfica

A aplicação da termografia segue um processo estruturado, composto por quatro fases principais: preparação, coleta de dados, análise e diagnóstico, e elaboração do relatório.

a) Preparação

- **Identificação do problema:** definir o objetivo da inspeção, como detectar falhas em painéis elétricos, vazamentos em telhados ou pontes térmicas em edificações.
- **Planejamento:** estabelecer o escopo e a periodicidade da inspeção (anual, mensal ou trimestral), considerando a criticidade do sistema.
- **Seleção do equipamento:** escolher a câmera termográfica adequada e ajustar parâmetros como emissividade, distância e temperatura ambiente, assegurando a precisão das medições.

b) Coleta de Dados

- **Inspeção em campo:** realizar a varredura do objeto com a câmera infravermelha, capturando imagens estáticas e vídeos que mostrem a distribuição térmica.
- **Sincronização de informações:** coletar simultaneamente termogramas, imagens digitais e dados operacionais dos equipamentos inspecionados.
- **Condições de medição:** preferencialmente realizar a inspeção com o sistema em funcionamento, para identificar pontos de sobreaquecimento.

c) Análise e Diagnóstico

- **Processamento das imagens:** utilizar softwares específicos para interpretar os termogramas e identificar anomalias térmicas.
- **Análise comparativa:** confrontar os resultados com inspeções anteriores, permitindo o monitoramento da evolução de falhas.
- **Diagnóstico técnico:** avaliar a gravidade dos problemas detectados, como conexões elétricas frouxas, falhas de isolamento térmico ou infiltrações.

d) Elaboração do Relatório

- **Documentação técnica:** elaborar relatório contendo termogramas, imagens convencionais, descrição das anomalias, recomendações de manutenção e priorização das ações corretivas.

2.4.2 Aplicações na Engenharia Civil

A termografia possui ampla aplicação na engenharia civil, auxiliando no diagnóstico e manutenção de edificações:

- **Detecção de patologias:** identifica infiltrações, descolamento de revestimentos, falhas de isolamento e pontes térmicas em fachadas e coberturas.
- **Inspeção de concreto:** localiza anomalias internas e tubulações embutidas em elementos estruturais.
- **Auditorias energéticas:** detecta perdas de calor e vazamentos de ar, otimizando o desempenho energético das edificações.

2.4.3 Vantagens da Metodologia

A inspeção termográfica apresenta benefícios significativos em comparação a métodos convencionais:

- **Técnica não destrutiva e não invasiva**, dispensando desmontagens e interrupções operacionais.
- **Redução de custos**, possibilitando a detecção precoce de falhas e diminuindo despesas com manutenções corretivas.
- **Aumento da segurança**, prevenindo falhas graves, como incêndios causados por sobreaquecimento.
- **Maior vida útil dos ativos**, permitindo intervenções preventivas e conservação das estruturas.

2.5. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS TÉRMICAS

A análise e interpretação de imagens térmicas representam uma etapa essencial no uso da termografia infravermelha aplicada à inspeção e diagnóstico de fachadas. Enquanto a aquisição das imagens depende de parâmetros técnicos e condições ambientais controladas, a interpretação é o processo que transforma dados térmicos em informações diagnósticas sobre o estado do edifício. Assim, a análise termográfica exige não apenas conhecimento sobre o comportamento térmico dos materiais de construção, mas também sobre as patologias construtivas que alteram a distribuição de temperatura na superfície inspecionada. Segundo Grinzato, Bison e Marinetti (2002), a correta interpretação das imagens térmicas requer a compreensão das propriedades térmicas dos materiais e das condições ambientais envolvidas, sendo essa etapa determinante para o sucesso da avaliação não destrutiva.

De modo geral, a interpretação de imagens térmicas busca identificar padrões de temperatura anômalos que indiquem falhas de aderência, infiltrações, fissuras, pontes térmicas ou defeitos em revestimentos. O princípio básico é que cada material possui uma condutividade térmica e emissividade específicas; quando ocorre uma descontinuidade (como descolamento de revestimento ou presença de vazios), há alteração na forma como o calor é transmitido e dissipado, gerando contrastes visuais nos termogramas. Conforme ressaltam Freitas, Carasek e Cascudo (2013), a correta interpretação depende da compreensão de que o termograma expressa apenas temperaturas superficiais aparentes, que precisam ser correlacionadas ao contexto físico da fachada.

Na prática, o processo de interpretação envolve diversas etapas. Primeiramente, o pré-processamento das imagens é fundamental para corrigir emissividade, refletância e temperatura ambiente. Em seguida, realiza-se a análise qualitativa, que consiste na leitura visual dos termogramas e identificação de zonas com contraste térmico fora do padrão. Essa etapa, embora essencial, é suscetível a subjetividade; por isso, vem sendo complementada por métodos quantitativos, como a extração de perfis térmicos e o uso de histogramas para comparar temperaturas médias em regiões específicas da fachada (BAUER *et al.*, 2016).

Além disso, o avanço tecnológico tem permitido o uso de softwares especializados de análise termográfica, capazes de associar imagens térmicas a modelos 3D ou mapas de fachada, aumentando a precisão e rastreabilidade do diagnóstico. Ferramentas digitais também permitem realizar ajustes automáticos de emissividade e registrar metadados (como temperatura ambiente, umidade relativa e distância da lente ao alvo), informações indispensáveis para uma interpretação confiável.

Outro aspecto relevante é o controle das condições de inspeção, uma vez que a radiação solar, o vento e a temperatura ambiente influenciam diretamente os resultados. Como apontado por Tomita *et al.* (2022), uma diferença de temperatura mínima de 10 °C entre o interior e o exterior da parede, ou entre regiões sombreadas e expostas ao sol, é recomendável para gerar contrastes térmicos suficientes à análise. Dessa forma, a interpretação só deve ser realizada após verificar que o termograma foi obtido em condições adequadas, evitando conclusões incorretas.

Recentemente, estudos têm buscado automatizar parte da interpretação, aplicando técnicas de processamento digital de imagens e inteligência artificial para identificar padrões térmicos correspondentes a diferentes tipos de falhas. Essa tendência amplia o potencial da

termografia, reduzindo a dependência da análise visual humana e tornando os diagnósticos mais objetivos. Entretanto, mesmo com o auxílio de algoritmos, a interpretação deve ser sempre validada por um profissional capacitado, em conformidade com as normas vigentes (como a ABNT NBR 16818:2020), que estabelecem critérios para ensaios não destrutivos por termografia infravermelha.

Em síntese, a análise e interpretação de imagens térmicas na inspeção de fachadas exigem uma abordagem técnica e crítica, integrando conhecimento sobre materiais, fenômenos físicos e condições de aquisição. Quando bem executada, essa etapa permite não apenas detectar precocemente as patologias construtivas, mas também otimizar o planejamento de manutenção, priorizando intervenções e garantindo maior segurança e durabilidade às edificações.

2.6. COMPARAÇÃO COM OUTRAS TÉCNICAS DE INSPEÇÃO

Segundo a revista Técnico-Científica do CREA-PR, A termografia infravermelha tem se destacado entre as técnicas não destrutivas aplicadas à inspeção, especialmente por sua capacidade de detectar anomalias ocultas de forma rápida, segura e sem necessidade de contato direto com a estrutura. Tradicionalmente, o diagnóstico de patologias em revestimentos externos é realizado por métodos convencionais, como a inspeção visual direta, os ensaios de percussão, a endoscopia e as medições pontuais de umidade. Esses procedimentos, embora amplamente utilizados, apresentam limitações relacionadas à abrangência, à subjetividade da análise e ao risco associado ao acesso físico da fachada, o que frequentemente demanda o uso de balancins ou andaimes.

De acordo com Takeda e Mazer (2023), a termografia infravermelha reduz a subjetividade presente nas avaliações visuais e permite a análise global do desempenho térmico do edifício. O método baseia-se na detecção de variações de temperatura na superfície da fachada, que podem indicar descolamentos, infiltrações, presença de umidade ou discontinuidades entre camadas do revestimento. Estudos recentes reforçam que a termografia, quando bem aplicada, é capaz de identificar delaminações e falhas não perceptíveis a olho nu, oferecendo resultados mais abrangentes que os métodos tradicionais (Bauer *et al.*, 2016; Garrido, Lagüela & Arias, 2018).

Entretanto, a aplicação da termografia apresenta limitações que devem ser cuidadosamente consideradas. Chen *et al.* (2025) destacam que a precisão da técnica

depende fortemente das condições ambientais, sendo a radiação solar, a velocidade do vento e a variação da temperatura ambiente fatores determinantes para a qualidade das leituras. Do mesmo modo, Bauer *et al.* (2016) ressaltam que é essencial aproveitar períodos com gradiente térmico adequado — isto é, quando a diferença de temperatura entre o ambiente e a superfície da fachada (ΔT) é suficiente para destacar as anomalias térmicas. Além disso, Zhu *et al.* (2022) observam que a correta interpretação dos termogramas requer operadores experientes, capazes de distinguir entre diferentes padrões térmicos gerados por defeitos estruturais, variações de materiais ou simples efeitos ambientais.

Dessa forma, a literatura recomenda que a termografia seja utilizada de forma integrada com outras técnicas de inspeção, como o ultrassom, os ensaios de percussão e a análise visual detalhada, a fim de complementar os resultados e reduzir o risco de diagnósticos equivocados (Meola, 2013). Essa abordagem híbrida tem se mostrado particularmente eficiente para o monitoramento preventivo de fachadas e para o planejamento de intervenções de manutenção predial.

2.7. NORMAS E DIRETRIZES TÉCNICAS

As normas e diretrizes técnicas para a termografia na engenharia civil, tanto no Brasil quanto em âmbito internacional, garantem a correta aplicação do método e a confiabilidade dos diagnósticos de patologias, inspeções e monitoramentos. Essas referências estabelecem parâmetros de qualidade, segurança e competência profissional para a execução dos ensaios termográficos.

2.7.1. Normas da ABNT (Brasil)

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define as principais regras e procedimentos para a aplicação da termografia no país. Entre as normas mais relevantes, destacam-se:

- **ABNT NBR 15424:2022 — Termografia — Terminologia:** Define os principais termos e conceitos aplicados à área, diferenciando ensaios termográficos (usados em Ensaios Não Destrutivos) de inspeções termográficas (voltadas ao monitoramento e manutenção).
- **ABNT NBR 16818:2020 — Ensaios Não Destrutivos — Termografia Infravermelha — Procedimento para Aplicações:** Estabelece os princípios

gerais, técnicas e procedimentos para a aplicação do método termográfico, incluindo a coleta e análise de dados térmicos.

- **ABNT NBR 15572 — Ensaios Não Destrutivos — Termografia — Guia para Inspeção de Equipamentos Elétricos e Mecânicos:** Embora voltada a equipamentos industriais, fornece diretrizes metodológicas úteis que podem ser adaptadas à engenharia civil, auxiliando na detecção de falhas e anomalias construtivas.
- **ABNT NBR 13753 — Revestimento de Paredes Internas com Argamassa de Reboco:** Relaciona-se à inspeção de revestimentos, podendo ser aplicada em conjunto com a termografia para identificar descolamentos e falhas de aderência em argamassas.

2.7.2. Normas Internacionais (ISO)

A **International Organization for Standardization (ISO)** estabelece diretrizes complementares voltadas à aplicação da termografia em edificações:

- **ISO 6781-3:2015 — Desempenho de Edifícios — Detecção Termográfica de Anomalias — Parte 3: Qualificação e Competência de Pessoal:** Define os requisitos de qualificação e competência profissional para especialistas que realizam inspeções termográficas, interpretam dados e elaboram relatórios técnicos. A norma classifica a proficiência dos profissionais em três níveis, conforme o tipo e a complexidade das edificações inspecionadas.

2.7.3. Principais Aplicações na Engenharia Civil

A termografia infravermelha é amplamente empregada na engenharia civil como ferramenta de **diagnóstico não destrutivo**, permitindo a identificação de anomalias ocultas e falhas construtivas. Suas principais aplicações incluem:

- **Detecção de patologias:** identificação de infiltrações, descolamentos em revestimentos cerâmicos e argamassados, e falhas de impermeabilização.
- **Análise estrutural:** localização de fissuras internas, falhas de aderência e anormalidades em estruturas de concreto armado.
- **Eficiência energética:** avaliação de perdas térmicas em fachadas, coberturas e isolamentos, contribuindo para o desempenho energético das edificações.

- **Inspeção de fachadas:** execução de inspeções detalhadas com uso de drones (VANTs), permitindo mapear patologias em grandes alturas ou áreas de difícil acesso.

2.8. DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Apesar dos avanços tecnológicos e da consolidação da termografia infravermelha como ferramenta de diagnóstico, ainda existem desafios técnicos, normativos e operacionais a serem superados. Um dos principais entraves é a ausência de normas e procedimentos padronizados que definam metodologias específicas para inspeção de fachadas. Embora existam diretrizes internacionais, como a norma TR 119:2024 publicada em Singapura, que estabelece parâmetros qualitativos para inspeções termográficas, o cenário brasileiro ainda carece de regulamentação consolidada voltada a essa aplicação. Essa lacuna dificulta a comparação entre estudos e a definição de critérios objetivos para a caracterização de anomalias térmicas.

Outro desafio relevante refere-se à influência das condições climáticas, que podem comprometer a confiabilidade das medições. Chen *et al.* (2025) reforçam que o desempenho da termografia depende do controle ambiental e que variações repentinas de temperatura, vento e umidade podem mascarar ou amplificar contrastes térmicos. Além disso, a correta interpretação das imagens térmicas exige conhecimento técnico avançado sobre transferência de calor e comportamento dos materiais de construção, o que torna indispensável a capacitação de profissionais especializados (Meola, 2013).

Mesmo diante dessas limitações, as perspectivas futuras são bastante promissoras. O uso de drones equipados com câmeras térmicas tem se mostrado uma tendência crescente, permitindo inspeções em áreas de difícil acesso de forma segura e eficiente (Garrido *et al.*, 2018). Paralelamente, o avanço da inteligência artificial e do aprendizado de máquina vem possibilitando a automatização da análise de termogramas e a identificação de padrões térmicos associados a diferentes tipos de falhas. Chen *et al.* (2025) e Takeda e Mazer (2023) apontam que a integração da termografia com tecnologias de modelagem digital, como o Building Information Modeling (BIM), e com gêmeos digitais (Digital Twins), tende a ampliar sua aplicação na manutenção preditiva e na gestão do ciclo de vida das edificações.

Esses avanços tecnológicos, aliados à redução dos custos dos equipamentos e à disseminação do conhecimento técnico, indicam que a termografia infravermelha deve se

consolidar como uma ferramenta essencial para o diagnóstico e a conservação de fachadas. À medida que os desafios de padronização e capacitação forem superados, a técnica deverá ocupar um papel central nas rotinas de inspeção predial, contribuindo para edificações mais seguras, sustentáveis e duráveis.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da termografia infravermelha representa um avanço significativo nas práticas de inspeção e manutenção de fachadas, oferecendo um diagnóstico preciso e não invasivo das patologias construtivas. Sua utilização contribui diretamente para a durabilidade, segurança e eficiência energética das edificações, reduzindo custos e otimizando intervenções preventivas.

Contudo, o desempenho da técnica depende do controle das condições de medição e da capacitação dos profissionais envolvidos, o que reforça a importância da normatização e da padronização dos procedimentos. Com o contínuo aprimoramento dos equipamentos, a integração com sistemas digitais e o desenvolvimento de algoritmos inteligentes, a termografia tende a se tornar indispensável no monitoramento e gestão do ciclo de vida das construções, consolidando-se como uma aliada estratégica da engenharia diagnóstica moderna.

REFERÊNCIAS

- ALTOÉ, L.; FILHO, D. O. *Termografia infravermelha aplicada à inspeção de edifícios*. 2012. DOI: 10.35818/ACTA.V7I1.113.
- ALVARENGA, C. do B. C. S.; CALDAS, R. B.; SÁTIRO, D. E. A.; AGUILAR, M. T. P.; SALES, R. B. C. *Preservação do patrimônio urbano por termografia passiva: estudo em fachadas de cerâmica em Belo Horizonte*. 2023. DOI: 10.11606/issn.2317-2762.posfauusp.2023.185927.
- AMARAL, G. M.; FREIRE, G. G. J.; CARASEK, H. *Uso da termografia infravermelha na identificação de umidade em elementos de vedação de edifícios*. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2016.
- ARANTES DE OLIVEIRA, S.; MORAIS DE OLIVEIRA, A.; GOMES DE OLIVEIRA BRANDSTETTER, M. C. *Revisão bibliográfica de métodos não destrutivos para investigação em campo de falhas em sistema de impermeabilização: termografia por infravermelho, georadar (GPR) e condutividade elétrica*. Revista Eletrônica de Engenharia Civil – REEC, Goiânia, v. 19, n. 2, p. 80–95, 2023. DOI: 10.5216/reec.v19i2.78186. Acesso em: 28 out. 2025.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 16818:2020 – Ensaios não destrutivos – Termografia infravermelha – Procedimento para aplicações do método da termografia infravermelha*. Rio de Janeiro, 2020.
- BALARAS, C. A.; ARGIRIOU, A. A. *Infrared thermography for building diagnostics*. *Energy and Buildings*, v. 34, n. 2, p. 171–183, 2002. DOI: 10.1016/S0378-7788(01)00105-0.
- BAUER, E.; PAVÓN, E.; OLIVEIRA, E.; PEREIRA, C. H. F. *Facades inspection with infrared thermography: cracks evaluation*. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, v. 1, n. 1, 2016. DOI: 10.1007/s41024-016-0002-9.
- BAUER, E. et al. *Analysis of building façade defects using infrared thermography*. *Infrared Physics & Technology*, v. 76, p. 1–9, 2016. DOI: 10.1016/j.infrared.2016.12.002.
- CHEN, J.; ZHANG, S.; ZHAO, G.; MISHRA, D.; YUEN, M. M. F. *Infrared thermography of façade delamination: quantifying environmental variability and heat transfer mechanisms*. *Construction and Building Materials*, v. 494, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.143177.
- DIAS, I. S.; FLORES-COLEN, I.; SILVA, A. M. *Critical analysis about emerging technologies for building's façade inspection*. *Buildings*, v. 11, n. 2, p. 53, 2021. DOI: 10.3390/buildings11020053.
- FREITAS, J. G.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. *Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura*. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 157–172, 2014. DOI: 10.1590/S1678-86212014000200011.
- FREITAS, J. G. de; CARASEK, H.; CASCUDO, O. *Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura*. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 1, p. 57–73, 2013.
- GARRIDO, I.; LAGÜELA, S.; ARIAS, P. *Infrared thermography's application to infrastructure inspections*. *Infrastructures*, v. 3, n. 3, p. 35, 2018. DOI: 10.3390/infrastructures3030035.
- GRINZATO, E.; BISON, P. G.; MARINETTI, S. *Monitoring of ancient buildings by the thermal method*. *Journal of Cultural Heritage*, v. 3, n. 1, p. 21–29, 2002.
- JULIANI, B. B. T. *Avaliação da utilização e viabilidade da termografia infravermelha em inspeções de revestimentos e estruturas na construção civil*. Monografia (Especialização) — Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- KIM, H. et al. *Innovations in building diagnostics and condition monitoring: a comprehensive review of infrared thermography applications*. *Buildings*, v. 13, n. 5, p. 1185, 2023. DOI: 10.3390/buildings13051185.

- MALDAGUE, X. *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- MEOLA, C. *Infrared thermography in the architectural field*. The Scientific World Journal, 2013. DOI: 10.1155/2013/323948.
- MEOLA, C.; CARLOMAGNO, G. M. *Recent advances in the use of infrared thermography*. Measurement Science and Technology, v. 15, n. 9, p. R27–R58, 2004.
- MENDONÇA, L. V.; AMARAL, M. M. do; CATARINO, P. S. *A termografia por infravermelhos como ferramenta para auxílio à inspeção e manutenção dos edifícios*. Lisboa, 2010. Disponível em: <https://www.spybuilding.com/private/admin/ficheiros/uploads/6b0dca6c9e15cc51dc73bde0562a31d5.pdf>. Acesso em: 28 out. 2025.
- NUNES TAVARES DA SILVA, R.; SANTANA MAGNANI, F. *Estudo da termografia por infravermelho: aplicações na engenharia e determinação de parâmetros termofísicos e geométricos de materiais*. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- RESENDE, M. M. et al. *Infrared thermal imaging to inspect pathologies on façades of historical buildings: a case study on the Municipal Market of São Paulo, Brazil*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, v. 7, p. 1–12, 2022. DOI: 10.1007/s41024-022-00164-z.
- SANTOS, C. F. dos; ROCHA, J. H. A.; PÓVOAS, Y. V. *Utilização da termografia infravermelha para detecção de focos de umidade em paredes internas de edificações*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 105–127, jan./mar. 2019.
- SINGAPORE STANDARDS COMMITTEE. *TR 119:2024 – Qualitative inspection of building façade using infrared thermography (IRT)*. Singapore Standards, 2024.
- TAKEDA, O. T.; MAZER, W. *Potential of thermographic analysis to evaluate pathological manifestations in facade cladding systems*. Revista ALCONPAT, v. 8, n. 1, 2023. DOI: 10.21041/ra.v8i1.181.
- TOMITA, K. et al. *A review of infrared thermography for delamination and defects in infrastructure*. Sensors, v. 22, n. 17, p. 6394, 2022. DOI: 10.3390/s22176394.
- TOMITA, K.; KIM, H.; KAWANO, A. *A review of infrared thermography for delamination and defects in infrastructure*. Infrared Physics & Technology, v. 122, p. 104090, 2022. DOI: 10.1016/j.infrared.2022.104090.

CAPÍTULO XI

REVISANDO AS NORMAS ASTM G148-97 E ISO 17081:2004: UMA PERSPECTIVA CRÍTICA E EXPERIMENTAL SOBRE A AVALIAÇÃO DA DIFUSIVIDADE DE HIDROGÊNIO EM METAIS E LIGAS

REVIEWING ASTM G148-97 AND ISO 17081:2004 STANDARDS: A CRITICAL AND EXPERIMENTAL PERSPECTIVE ON THE EVALUATION OF HYDROGEN DIFFUSIVITY IN METALS AND ALLOYS

DOI: 10.51859/amplla.mas5450-11

João Paulo Dantas de Carvalho¹
Eudésio Oliveira Vilar²

¹ Departamento de Engenharia Química; Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande PB

² Laboratório de Engenharia Eletroquímica; Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande PB

RESUMO

Desde a sua descoberta, em 1864 por Cailletet, a fragilização de metais por hidrogênio, foi sujeito a inúmeras investigações. Devanathan e Stachurski (1962) desenvolveram a técnica eletroquímica de permeação de hidrogênio em metais e ligas, tornando o estudo mais prático, esta metodologia se baseia em uma dupla célula eletroquímica dispostas simetricamente onde o metal a ser estudado é inserido entre elas. Uma da célula irá gerar o H₂ a ser permeado através do corpo de prova, na outra célula o mesmo será oxidado e seu fluxo quantificado. Toda a detecção é realizada potenciostaticamente, mas a geração pode ser realizada por meio galvanostático, potenciostaticamente ou em meio ácido. As normas ASTM 148-97 (2003) e ISO 17081 (2004) padronizam os experimentos de permeação eletroquímica de hidrogênio. Os diferentes métodos baseiam-se em soluções diferentes da segunda lei de Fick, porém as normas não consideram isto, adotando o cálculo da difusividade do hidrogênio apenas por um dos métodos, mesmo para aqueles que estudam os outros fenômenos. A literatura atesta a diferença entre os métodos de geração de H₂. Assim, o trabalho tem como objetivo elucidar o emprego dos modelos matemáticos para determinação do coeficiente de difusão do hidrogênio em metais através das distintas técnicas eletroquímicas de permeação, utilizando os aços API 5L X70 e X65, além disto procurou-se um modelo matemático para o caso em que a geração de hidrogênio seja realizada pelo método SCC.

Palavras-chave: Aço API 5L X70. API 5L X65. Técnica eletroquímica de permeação de hidrogênio. Difusão de hidrogênio em aços.

ABSTRACT

Since its discovery in 1864 by Cailletet, the hydrogen embrittlement of metals has been the subject of numerous investigations. Devanathan and Stachurski (1962) developed the electrochemical technique for hydrogen permeation in metals and alloys, making the study more practical. This methodology is based on a double electrochemical cell arranged symmetrically, with the metal being studied inserted between them. One cell generates the H₂ to be permeated through the specimen; in the other, it is oxidized and its flux quantified. All detection is performed potentiostatically, but generation can be performed galvanostatically, potentiostatically, or in an acidic medium. The ASTM 148-97 (2003) and ISO 17081 (2004) standards standardize electrochemical hydrogen permeation experiments. The different methods are based on different solutions to Fick's second law, but the standards do not consider this, adopting the calculation of hydrogen diffusivity using only one of the methods, even for those that study other phenomena. The literature attests to the difference between the H₂ generation methods. Therefore, this work aims to elucidate the use of mathematical models to determine the hydrogen diffusion coefficient in metals through different electrochemical permeation techniques, using API 5L X70 and X65 steels. Furthermore, a mathematical model was sought for the case in which hydrogen generation is performed using the SCC method.

Keywords: API 5L X70 steel. API 5L X65. Electrochemical hydrogen permeation technique. Hydrogen diffusion in steels.



1. INTRODUÇÃO

Aços grade API, como o API 5L X70 e X65, são largamente usados no transporte de petróleo e gás natural, seu tempo de vida útil é afetado tanto pelo fluido transportado, quanto pelas condições operacionais. Um dos motivos que causam a fragilização e degradação das propriedades mecânicas dos aços é devido a sua exposição ao hidrogênio (Haq, 2013). A reação de evolução do hidrogênio é a reação catódica mais comum que ocorre no mecanismo de corrosão bem como na proteção catódica e eletrodeposição, dentre outros processos eletroquímicos. Nestes casos os átomos de hidrogênio adsorvidos na superfície do metal tanto podem se combinar para formar microbolhas de H_2 que se desprendem na forma de gás como podem ser absorvidos pela estrutura cristalina do metal [Yan & Weng, 2006]. Como o átomo de hidrogênio é o elemento que possui menor tamanho entre todos os elementos da tabela periódica, ele pode se difundir rapidamente a temperatura ambiente e se aglomerar em defeitos mecânicos como microcavidades, contornos de grãos ou simplesmente reagir para formar hidretos metálicos. Tal fenômeno pode causar algum dano nas propriedades mecânicas do aço, causando falhas na sua estrutura e propagação de trincas no material [Yazdipour, 2012].

A técnica eletroquímica para o estudo da permeação do hidrogênio em metais e ligas, foi introduzida por Devanathan e Stachurski em 1962, esta técnica consiste em uma célula dupla, onde em uma célula há produção de hidrogênio e na outra acontece a detecção. Nesta metodologia a detecção é sempre realizada potenciostaticamente, no entanto pode-se gerar hidrogênio de diversas formas: por corrente constante (Galvanostático-potenciostático), por potencial constante (Duplo-potenciostático) e por permeação em circuito aberto em meio ácido (PCAA). No decorrer dos últimos anos, houve importantes avanços de pesquisas neste campo, no entanto questões têm sido levantadas, em especial quando se trata dos modelos matemáticos desenvolvidos com base nesta metodologia, e que vêm sendo usados no estudo do fenômeno de difusividade do hidrogênio em matrizes metálicas Araújo, (2014) e Araújo, (2013).

É comum encontrar em muitas publicações o cálculo da difusividade do hidrogênio, válido apenas para o método do duplo-potenciostato, mesmo que a produção de H_2 tenha sido conduzida galvanostaticamente, ou pela técnica PCAA. Esse cálculo inadequado, encontra-se nas normas ASTM G148–97 e ISO 17081:2004, que conduz muitos pesquisadores

a resultados equivocados. Boes & Zuchner (1976) e McBreen et al (1966) evidenciaram que ambos os métodos possuem condições de contorno distintas, portanto, trazem soluções igualmente diferenciadas a partir da solução da segunda lei de Fick. Constata-se que estas normas não justificam o porquê de se utilizar apenas uma equação independentemente do método utilizado para gerar hidrogênio.

Este trabalho tem como objetivo elucidar a questão abordada anteriormente, de acordo com a técnica eletroquímica utilizada. Os resultados foram obtidos a partir de ensaios eletroquímicos de permeação do hidrogênio nos aços API 5L X65 e X70.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. MATERIAL UTILIZADO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Os experimentos foram realizados com os aços o API 5L X65 e o API 5L X70, onde as composições nominais encontra-se na Tabela 1. Os aços foram cortados em amostras de 40mm de diâmetro e de aproximadamente 1mm de espessura, em seguida elas foram lixadas com papel SiC (200, 400, 600 1200), em seguida foi realizado o polimento com suspensão de alumina e posteriormente limpou-se cada amostra com etanol e acetona submetida a um banho de ultrassom em uma lavadora ultrassônica Unique Ultrasonic Cleaner – Modelo USC 1450A não foi utilizado revestimento de Pd.

Tabela 1 - Composição nominal do API 5L X70 e X65 em % (International Suppliers, LLC)

Aço	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	V
API 5L X70	0,17	0,45	1,65	0,02	0,01	0,05	0,006	0,09
API 5L X65	0,16	0,45	1,65	0,002	0,001	0,05	0,06	0,09

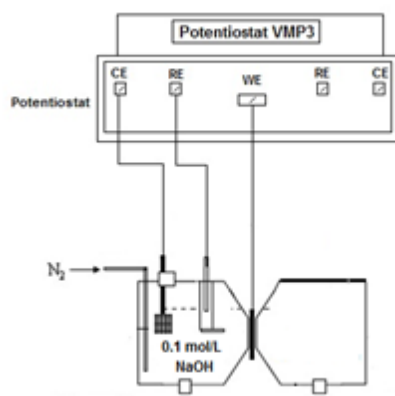
Fonte: Autoria Própria

2.2. TESTES ELETROQUÍMICOS

2.2.1. Polarização Potenciodinâmica

Esta técnica corresponde à etapa prévia do teste de permeação de hidrogênio, cujo seu princípio de funcionamento é baseado na variação continuamente o potencial de eletrodo e registra-se a variação de corrente, que também varia de uma forma contínua. Neste experimento determina-se o potencial e a corrente para geração de hidrogênio sobre a superfície do metal. A Figura 1 mostra a esquematização desta avaliação (Wolynech, 2003).

Figura 1 - Esquema do sistema experimental para ensaios de polarização potenciodinâmica [Onde: CE – Contra Eletrodo de Platina RE – Eletrodo de Referência (SCE) WE – Eletrodo de Trabalho (Amostra)]



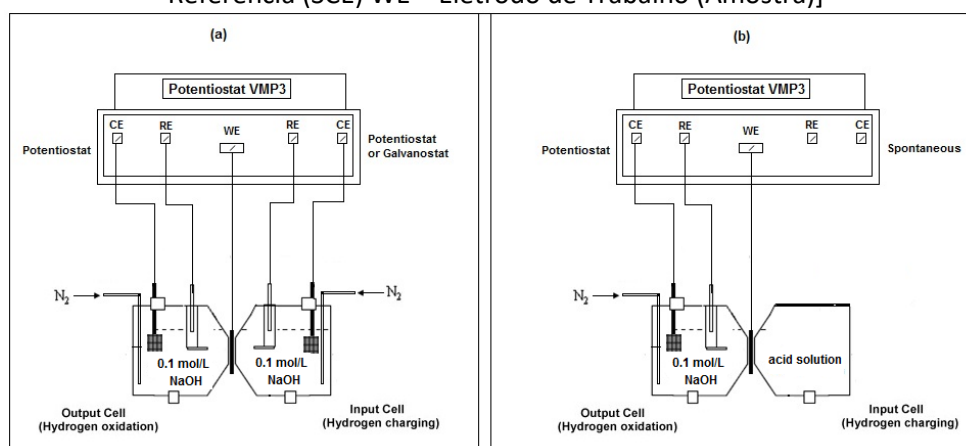
Fonte: Autoria Própria

2.2.2. Técnica Eletroquímica de Permeação

2.2.2.1. Permeação Duplo-Potenciostática e Galvanostática-Potenciostática

As medidas de permeação por hidrogênio foram realizadas a partir da técnica eletroquímica desenvolvida por Devathan & Starchurski (1966), em ambas células foi utilizado o eletrodo de referência, foi calomelano saturado (ECS) e como contra eletrodo platina. A amostra foi colocada entre as duas células com uma exposição de 3,14 cm². O lado anódico foi preenchido com uma solução de 0,1 mol.L⁻¹ de NaOH, onde o eletrodo de trabalho sofreu passivação de no mínimo 24 horas, em seguida aplicou-se um potencial de +300mV (ECS), até ser alcançado um valor de densidade de corrente < 0,2mA/cm² (corrente de fundo). Quando se atingiu a corrente de fundo, a célula catódica foi preenchida com 0,1 mol.L⁻¹ de NaOH, posteriormente foi aplicado a corrente ou potencial escolhida (o) pela curva de polarização potenciodinâmica. Uma vez atingido o estado estacionário – fluxo de hidrogênio constante, o experimento foi concluído. Todo controle e medição foi realizado através do potenciostato multicanal PAR (Princeton Applied Research) – Modelo VMP3. Todos os ensaios eletroquímicos foram realizados à temperatura ambiente ($\pm 25^{\circ}\text{C}$). A Figura 2 mostra o esquema experimental da técnica eletroquímica de permeação por hidrogênio.

Figura 2. Esquema dos conjuntos experimentais – célula eletroquímica de permeação: (a) métodos galvanostático e potenciostático; (b) PCAA. [Onde: CE – Contra Eletrodo de Platina RE – Eletrodo de Referência (SCE) WE – Eletrodo de Trabalho (Amostra)]



Fonte: Autoria Própria

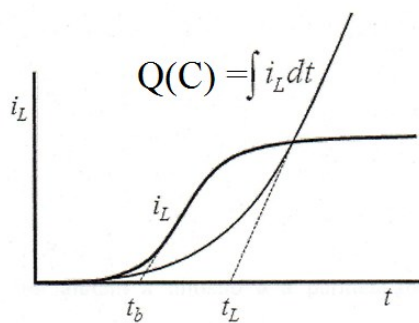
2.2.2.2. Permeação em circuito aberto em meio ácido (PCAA)

Outra forma de se produzir hidrogênio consiste na geração de hidrogênio a partir de um meio ácido, utilizando o H₂S borbulhado na solução de carga. Tsujikawa (1993) propôs o uso de tiosulfato de sódio como substituto do gás sulfídrico, sendo uma alternativa mais segura, pois este gás é extremamente tóxico. O efeito do gás sulfídrico é inibir a formação ou coalescência das moléculas de hidrogênio. Após ser atingido a corrente de fundo, a célula de carga foi preenchida com a solução NACE TM0284-96A (0,5% ácido acético glacial e 5% de NaCl) juntamente com 10⁻³mol.L⁻¹ de Na₂S₂O₃ pH =3,1-3,4 Tsujikawa (1993). Todo o controle e detecção foi realizado da mesma forma que no item anterior.

2.3. ANÁLISE DOS DADOS

A difusividade aparente foi calculada a partir do método de time-lag, mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Identificação dos tempos característicos em uma curva de permeação de hidrogênio.



Fonte: Adaptado de Boes & Zuchner (1976).

O time-lag (t_L) é definido como o tempo onde a matriz metálica começa a ser saturada pelo hidrogênio, sua quantificação é realizada através do cálculo da integral da corrente para um tempo $t > 0$, determinando-se a quantidade total de carga proveniente da oxidação do hidrogênio, este procedimento tem como resposta uma curva ascendente como representada pela Figura 3. A interseção da linha tangente com o eixo do tempo determina-se t_L .

Boes & Zuchner (1974) e Boes & Zuchner (1976) determinam a difusividade como função do 'time lag' de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Determinação da difusividade aparente de acordo com o método empregado

Tempos	Galvanostático-Potenciostático	Duplo-potenciostático
Time Lag (t_L)	$D = \frac{L^2}{2t_L} \quad (1)$	$D = \frac{L^2}{6t_L} \quad (2)$

Fonte: Autoria Própria

O método PCAA não se enquadra à princípio nenhuma equação específica para o cálculo da difusão, já que o procedimento experimental adotado não corresponde a nenhuma das metodologias descritas anteriormente, porém a equação (2) é recomendada pelas normas (ASTM G148-97; ISO 17081:2004) sem nenhuma justificativa plausível.

Até o momento não se tem uma ideia de qual destas metodologias se enquadraria ou se ajustaria melhor ao procedimento por PCAA. Diante disto, o presente trabalho procurou elucidar esta questão, também procurou-se propor uma equação para estimar a difusividade para este caso particular. A equação escolhida foi para correlacionar os dados experimentais

foi a sigmoide logística, descrita pela Equação (3). Com auxílio do OringinPro 6.0 ajustou-se todas as curvas de permeações de hidrogênio.

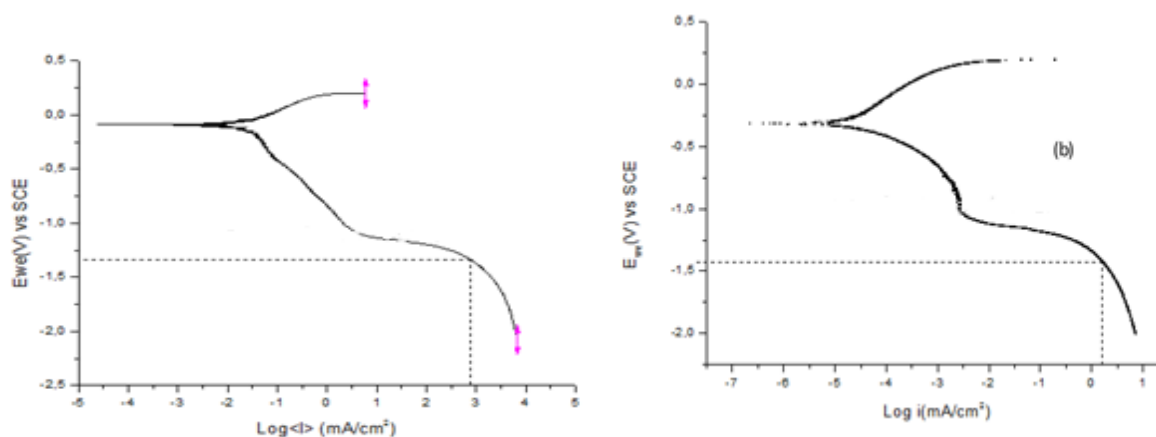
$$f(x) = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^p} \quad (3)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA

A curva de polarização potenciodinâmica para os aços API 5L X65 e X70 obtidas à temperatura ambiente são mostradas na Figura 4.

Figura 4 - Curva de Polarização potenciodinâmica para os aços API 5L X65 (a) e X70 (b)



Fonte: Autoria Própria

Observa-se na Figura 4, após o ponto de inflexão (-1,15 V em ambos casos) tem início a produção de hidrogênio molecular. Para o aço API 5L X65 foi escolhido uma densidade de corrente igual a -1,8 mA/cm² que corresponde a um potencial de -1,21V, de forma semelhante para o API 5L X70, selecionou-se -1,6 mA/cm² que corresponde ao potencial de -1,43 V. No entanto, caso as condições escolhidas de corrente/potencial fossem maiores acarretaria em formação de bolhas na superfície da amostra, havendo diminuição da área efetiva, dificultando o processo de adsorção, posteriormente prejudicando o processo de difusão (Fu & Cheng, 2010).

3.2. ENSAIOS DE PERMEAÇÃO

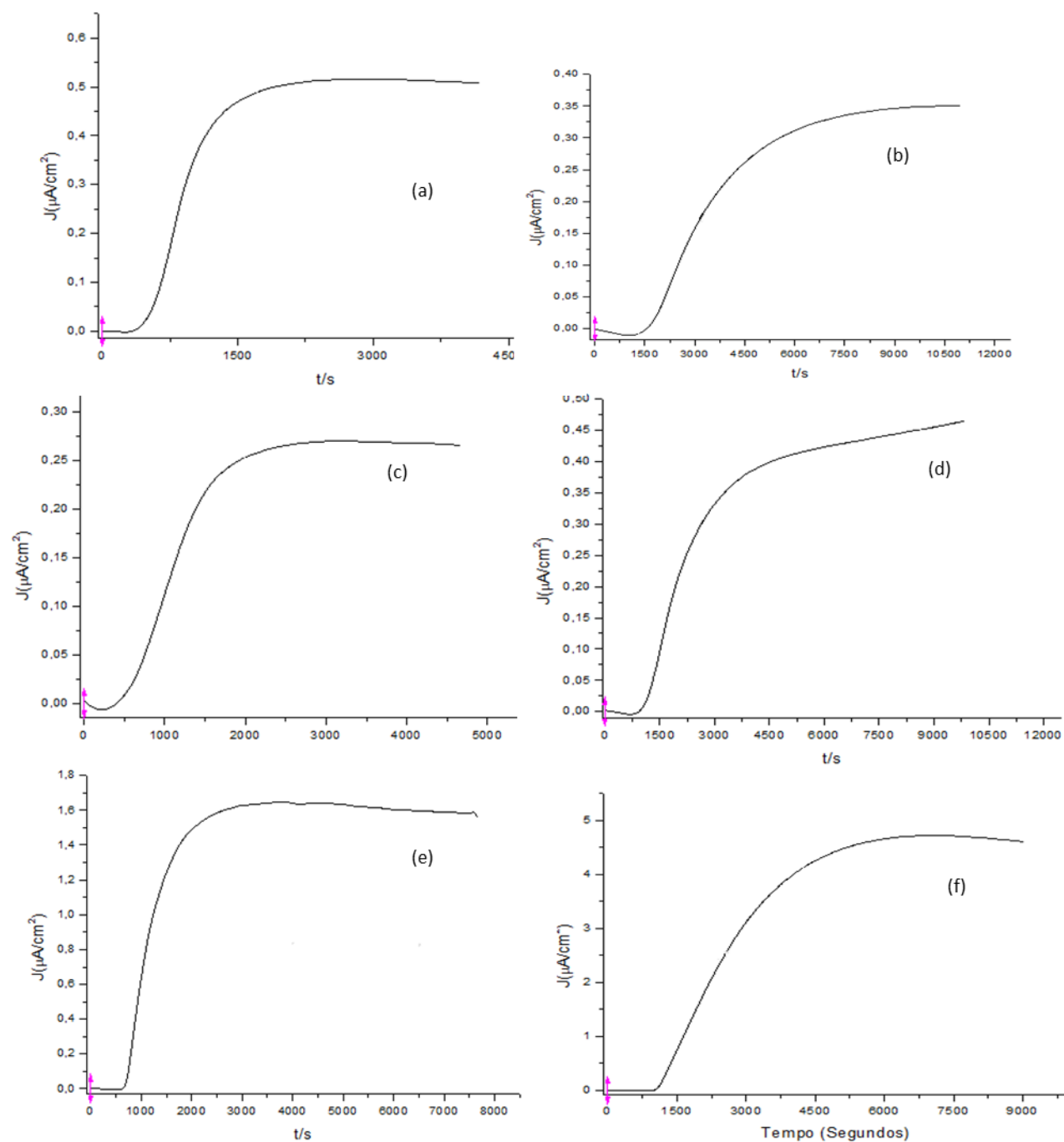
A Figura 5 mostra as curvas experimentais de permeação de hidrogênio para os aços API 5L X65 e API 5L X70, utilizando os métodos galvanostático-potenciostático (GP), duplo-potenciostático (DP) e PCAA.

Em todos os casos é observado um pequeno “delay” no começo do processo de difusão. Este fenômeno pode ser relacionado aos processos de superfície que afetam a entrada de hidrogênio no metal, e/ou pelos efeitos microestruturas da amostra Zacroczymski et al (1985), Zacroczymski (2006), Boiadjieva (2013). Analisando de outra forma: existe um certo tempo para que o hidrogênio seja gerado e adsorvido em seguida ser absorvido e difundido até ser detectado do outro lado da célula.

Pode-se também ser avaliado nas curvas experimentais a existência de três zonas: a zona ‘delay’, a zona difusiva e a zona estacionária. Na zona difusiva o hidrogênio preenche os sítios da matriz metálica do metal, e uma certa porção consegue ser difundido completamente e ser detectado no outro lado da célula, no entanto cada vez mais a amostra é preenchida e mais átomos conseguem se difundir completamente, até que essa estrutura seja completamente saturada e atinja o estado estacionário. Esta etapa consiste no transporte mássico transiente, sendo regido de acordo com a segunda lei de Fick. A zona estacionária, acontece quando a matriz metálica está saturada com hidrogênio, ou seja, a porção de H que é absorvida é a mesma que é difundida e detectada, caracterizando transporte mássico em estado estacionário regido pela primeira lei de Fick

De acordo com a Figura 5, avalia-se que o tempo para se atingir o estado estacionário foi menor no aço API 5L X65 do que o X70, devido às suas características microestruturas. Também é observado que o método PCAA, alcançou o estado estacionário com o valor de densidade de corrente muito superior aos ensaios GP e DP, tal fato mostra que neste ensaio uma quantidade maior de hidrogênio atravessou a membrana metálica do que os demais experimentos, devido ao aparecimento de microerosões provocado pelo ataque ácido.

Figura 5 – Curvas experimentais de permeação de hidrogênio: (a) Método GP API 5L X65 (b) Método GP API 5L X70 (c) Método DP API 5L X65 (d) Método DP API 5L X70 (e) Método PCAA API 5L X65 (f) Método PCAA API 5L X70



Fonte: Autoria Própria

3.3. COMPARAÇÃO DA DIFUSIVIDADE CALCULADA PELA CORRELAÇÃO RECOMENDADA PELAS NORMAS ISO 17081 (2004) E ASTM 148-97 (2003) E PELOS MODELOS GP E DP

As soluções da segunda lei de Fick para os casos GP e DP, datam de mais de quarenta anos. Tais padrões foram propostos em 2003 e 2004, que resultaram nas normas ASTM e ISO respectivamente. O conjunto destas equações retratam condições de geração de hidrogênio, perfis de concentração e correlação para o cálculo da difusividade totalmente distintas, de acordo com o método utilizado; DP ou GP (McBreem et al, 1966; Boes & Zuchner, 1974; Boes & Zuchner 1976).

$$J(t) = J_{ss} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp \left(-\frac{n^2 \pi^2 Dt}{L^2} \right) \right] \quad (4)$$

$$J(t) = J_{ss} \left[1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp \left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 Dt}{4L^2} \right) \right] \quad (5)$$

Estas equações descrevem o fluxo de hidrogênio em estado não-estacionário para os métodos DP (4) e GP (5), onde J_{ss} é a densidade de corrente em estado estacionário, L a espessura da membrana, $J(t)$ é a medida da densidade de corrente em um tempo t .

A recomendação das normas ISO 17081 (2004) e ASTM 148-97 (2003), não são adequadas para aqueles trabalhos que utilizam em sua grande maioria, o método GP. Tais normatizações só usam um dos modelos citados, no caso a solução do método duplo-potenciostático para o cálculo da difusão aparente. Muitos trabalhos na literatura fazem discussões questionáveis sobre o método de calcular a difusividade de um aço por essa metodologia, muitos utilizam a metodologia GP, porém calculam este parâmetro por meio da Equação (2) que é um método DP. Tabela 2 mostra alguns trabalhos que cometem esse erro.

Uma questão que se levantar é que tais trabalhos de desenvolvimento das soluções da segunda lei de Fick, já haviam sido escritos quando houve a normatização destes experimentos, e por quê razão tais órgãos, sérios e competentes, não atentaram para o fato de que segundo a metodologia experimental empregada, demandaria uma solução correspondente para o cálculo da difusividade do hidrogênio. Pode-se admitir ainda uma certa justificativa destas normas pensando no aspecto relativo do resultado da difusividade entre vários metais e ligas. No entanto em se tratando de estudos como a determinação da densidade de sítios aprisionadores reversíveis e irreversíveis de hidrogênio ou a estimativa de

energias de aprisionamento, ou até mesmo para a avaliação do tempo em que um aço que exposto ao hidrogênio irá fraturar. Isto demanda uma análise mais acurada e precisa do coeficiente de difusão.

A Tabela 3, mostra a difusividade quantificada para os aços API 5L X65 e X70, usando os diferentes métodos, ou seja, utilizando a Equação (2), que descreve a correlação aplicada pelas normas ISO e ASTM. A equação (1), utilizada para estimar o coeficiente de difusividade utilizando o método GP. Neste caso o parâmetro “time-lag” foi estimado de acordo com as normas, ou seja, o valor do tempo que corresponde a $J(t)/JSS = 0,63$.

Tabela 3 - Resumo de alguns trabalhos que utilizam a metodologia GP.

Material	Polimento	Tratamento	Célula de detecção	Célula de carga	Difusividade	Autores
API 5L x-70	2000 papel SiC 1 e 3 µm de pasta de diamante	Revestimento de Paládio (Detecção)	0,1M NaOH +250mV vs SCE >1µA (CF)	0,1M H ₂ SO ₄ 3 g/L NH ₄ SCN -5 mA	$D_{eff} = \frac{1}{6} \frac{L^2}{t_L}$	Mohtadi-Bonab (2013)
API 5L x-70	Polido	Revestimento de Níquel (Detecção)	0,1M NaOH +300mV vs SCE	0,5M H ₂ SO ₄ 250mg/L As ₂ O ₃ -0,5mA/cm ²	“	Dong (2009)
API 5L x-80	1200 papel SiC 1 µm de pasta de diamante	Revestimento de Níquel (Detecção)	0,1M NaOH +200mV vs SCE	0,5M H ₂ SO ₄ -10mA/cm ²	“	Xue & Cheng (2012)
Fe-C-Mo	4000 papel SiC	-----	0,1M NaOH +358mV vs SSE >0,1µA/cm ² (CF)	1M H ₂ SO ₄ -(5-200) mA/cm ²	$D_{app} = \frac{1}{6} \frac{L^2}{t_L}$	Frappart (2010)
API 5L X-80	Polido 0,3µm Alumina	Revestimento de Níquel (Detecção)	0,1M NaOH +0,15V vs Ag/AgCl	-10mA 1%NaCl 5mL Ac. Acético 0,4g/L Na ₂ S.H ₂ O	$D_{eff} = \frac{1}{6} \frac{L^2}{t_L}$	Han (2012)
AISI 430	-----	-----	0,1 N NaOH +50mV vs SCE	0,1N Ác. Acético + 0,2 N Acetato de Sódio -500 A/m ²	“	Yen & Huang (2003)

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 4 mostra tanto os resultados de difusividade calculada pela recomendação da ISO e ASTM, quanto para os demais modelos, a maioria dos resultados são próximos, porém alguns diferem muito ao padrão, com isso levanta-se a questão de saber qual equação para estimar o coeficiente de difusão é a mais recomendada.

Tabela 4 - Estimativa da difusividade por diferentes métodos

Material	Método Utilizado na Permeação	D_{app} ($\cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	D_{app} ISO/ASTM ($\cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
		$D = \frac{L^2}{2t_L}$ (1)	$D = \frac{L^2}{6t_L}$ (2)
API 5L X70	GP	2,78±0,85	1,74±0,71
	DP	-	0,99±0,02
	PCAA	2,69±0,68	1,24±0,24
API 5L X65	GP	6,01±0,05	2,33±0,09
	DP	-	2,45±0,31
	PCAA	5,53±1,95	2,11±0,61

Fonte: Autoria Própria

3.4. PROPOSTA DE UM MODELO PARA O CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE USANDO A METODOLOGIA PCAA

Como foi abordado anteriormente, os dados experimentais foram correlacionados com a equação sigmoide logística, os parâmetros, médios de cada material para cada metodologia de hidrogênio, da equação (3) encontram-se na Tabela 5.

Analisando a Tabela 5, inicialmente, pode-se verificar que a equação proposta se ajustou significativamente aos dados experimentais, tendo a maioria dos ajustes valores de $R^2 = 0,99$. Outro fator a ser observado diz respeito aos valores de A_1 . Estes podem ser considerados desprezíveis ou não significativos para os resultados da equação 3. Avaliando as curvas experimentais mostradas anteriormente, juntamente com as Tabelas acima, pode-se assumir o parâmetro x_0 corresponde ao ponto onde a relação $J(t)/J_{SS}$ tem um valor aproximado de 0,5. Outro parâmetro que chamou atenção foi o valor do expoente p . Foi observado que seu valor dependeu do material estudado, onde no presente estudo, esta variação situou-se entre 3 e 4,2.

Tabela 5 - Parâmetros da Equação 3 para a permeação de Hidrogênio para o aço API 5L X65 e X70

Geração de H ₂	Material	R ²	A ₁	A ₂	x ₀	p
GP	X65	0,99	-0,01	0,99	889	4,24
	X70	0,99	-0,03	1,01	2367	3,014
DP	X65	0,99	-0,03	1,03	1058	3,953
	X70	0,99	-0,05	1,06	2590	2,952
PCAA	X65	0,99	-0,001	1,06	1093	4,27
	X70	0,99	-0,001	1,01	2027	3,14

Fonte: Autoria Própria

O último parâmetro analisado foi o A2. Neste caso ele está relacionado com a inclinação da curva transiente de permeação, ou com o perfil sigmoide. Por outro lado, a magnitude desta inclinação vai estar relacionada com as características físico-químicas do material, como sua difusividade e espessura. Estes determinam a maior ou menor resistência oferecida pela membrana metálica ao fluxo de hidrogênio, além de influenciar no tempo necessário para que seja atingido seu estado estacionário. A equação (6) mostra a correlação empírica proposta para o cálculo da difusividade D, portanto esta foi a correlação proposta para calcular a difusividade usando a metodologia PCAA associada ao ajuste de curva sigmoide aos dados experimentais. Vários parâmetros de temporais foram utilizados para fazer esta estimativa, (x_0 , t_b etc.), porém o que obteve melhor ajuste foi quando se usou o t_L determinado a partir da integração da curva de permeação.

$$A_2 = \frac{L^2}{D \cdot t_L} \rightarrow D = \frac{L^2}{A_2 \cdot t_L} \quad (6)$$

Onde L – Espessura da membrana metálica

D – Difusividade a ser estimada

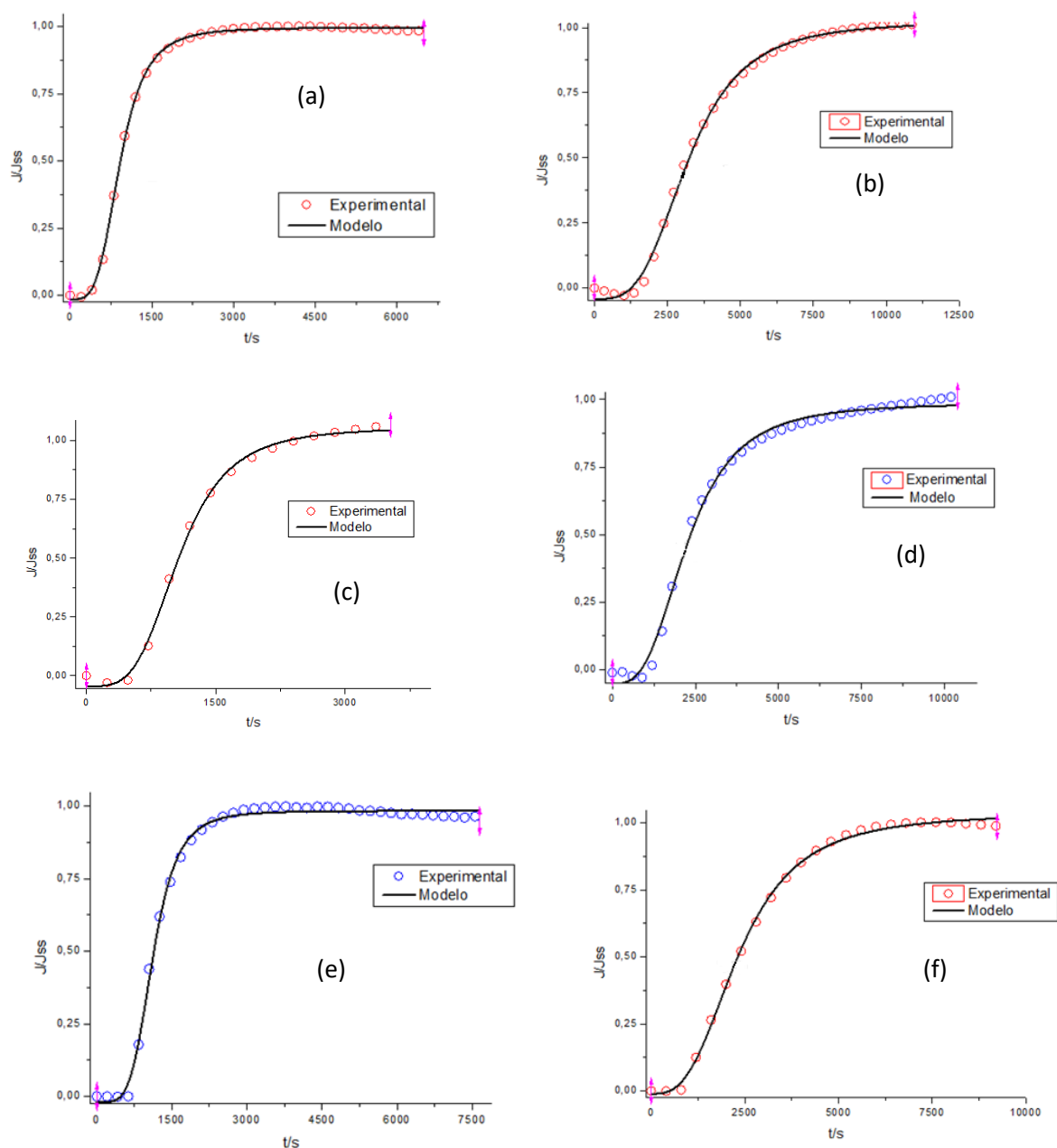
t_L – Time-lag

Os resultados foram tão promissores, que se estendeu a análise para os demais métodos. Baseado no que foi discutido até agora a equação sigmoide logística se resume a Equação (7), onde esta equação é válida para os métodos Galvanostático-potenciostático, duplo-potenciostático e também para o PCAA.

$$\frac{J(t)}{J_{ss}} = \frac{L^2}{D \cdot t_L} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{t}{t_{1/2}} \right)^p} \right) \quad (7)$$

Com o intuito de testar a validade do modelo, ajustou-se os dados experimentais com a equação proposta (Figura 6), também foi quantificado os valores da difusividade, tanto utilizando as equações tradicionais como também a correlação proposta.

Figura 6 – Curvas experimentais de permeação de hidrogênio ajustado com o modelo proposto: (a) Método GP API 5L X65 (b) Método GP API 5L X70 (c) Método DP API 5L X65 (d) Método DP API 5L X70 (e) Método PCAA API 5L X65 (f) Método PCAA API 5L X70



Fonte: Autoria Própria

A Figura 6 mostra que os dados experimentais foram ajustados quase que perfeitamente ao modelo proposto. Foi calculado a difusividade utilizando a correlação proposta, Equação (6), também se estimou a difusividade pelos demais métodos (DP e GP) e os resultados foram comparados em termos de erro médio, todos os resultados encontram-se na Tabela (6).

Tabela 6 - Estimativa dos coeficientes de difusão por diferentes métodos

Material/ Método de Permeação	Difusividade ($\cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) ISO/ASTM	Difusividade ($\cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) Correlação Proposta	Erro Médio (%) Norma/Proposto	Difusividade ($\cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) GP	Erro Médio (%) GP/Proposto
API 5L X70/ GP	1,19±0,02	6,99±0,12	82,84	3,59±0,06	48,52
API 5L X70/ DP	1,61±0,01	9,37±0,03	82,84	4,82±0,01	48,52
API 5L X70/ PCAA	1,44±0,06	8,43±0,39	82,84	4,34±0,21	48,52
API 5L X65/ GP	3,17±0,02	18,54±0,12	82,88	9,52±0,05	48,64
API 5L 65/ DP	3,19±0,13	18,56±2,12	82,88	9,54±1,25	48,64
API 5L X65/ PCAA	2,55±0,17	14,76±1,06	82,88	7,65±0,55	48,64
API 5L X60/ GP	1,26±0,01	15,89±4,18	88,12	5,84±0,04	64,35
API 5L X80/ GP	1,26±0,17	5,43±0,23	76,65	3,83±0,69	29,97

Comparando os erros médios entre as metodologias, verifica-se que a correlação para o cálculo da difusividade pelas normas ASTM e ISO possui maior erro quando relacionado com a equação proposta. O método GP possuiu erro médio menor, do que a correlação descrita pelas normas, porém este erro ainda é muito alto, alcançando erro médio de até 48%. Este resultado de certa forma preocupa, pois, além de apresentar valores subestimados, coloca em questão a validade das correlações tradicionais utilizadas.

4. CONCLUSÕES

Este estudo buscou questionar a utilização de um modelo de equação única recomendado pelas normas ASTM 148-97 (2003) e ISO 17081 (2004), independentemente da metodologia eletroquímica, ou mais precisamente, da GP e do PCAA.

No presente artigo, a função sigmoide logística proposta foi definida para os dados experimentais de permeação, com um coeficiente de correlação da ordem de 0,99 para a metodologia PCAA. As correlações propostas para o cálculo da difusividade aparente mostraram-se adequadas não apenas para este último caso, mas também para outros métodos.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, D. F. **Avaliação de sítios aprisionadores de hidrogênio em aços API 5L X65 e API 5L X70 utilizados no setor petroquímico**. 2013. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

- ARAÚJO, D.F.; VILAR, E.O.; PALMA CARRASCO, J. **A critical review of mathematical models used to determine the density of hydrogen trapping sites in steels and alloys.** Int J of Hydrogen Energy. 2014;39:12194 – 200.
- ASTM G 148-97.** Standard Practice for Evaluation of Hydrogen Uptake, Permeation, and Transport in Metals by an Electrochemical Technique, 2003
- BOES, N. ZUCHNER, H. **Electrochemical Methods for Diffusion Measurements.** Ber. Bunsenges. Phys. Chem.,v. 76, n. 8, p. 783 – 790. 1972.
- BOES, N. ZUCHNER, H. **Electrochemical methods for studying diffusion, permeation and solubility of hydrogen in metals.** Journal of the Less-Common Metals. 1976;49:223-46.
- BOIADJIEVA, TZ.; MIRKOVA, L.; KRONBERGER, H.; STECK, T.; MONEV, M. **Hydrogen permeation through steel electroplated with Zn or Zn–Cr coatings.** Electrochimica Acta. 2013;114:790–8.
- CAILLETET, L. **Compt. Rend.** 1864;58:327.
- DEVANATHAN, M. A. V; STACHURSKI, Z. **The Adsorption and Diffusion of Electrolytic Hydrogen in Palladium.** Proceedings of the Royal Society. 1962;A270:90- 102.
- DONG, C.F.; LI, X.G.; LIU, Z.Y.;ZHANG Y.R. **Hydrogen-Induced Cracking And Healing Behaviour Of X70 Steel.** Journal Of Alloys And Compounds. 2009;484:966–72.
- FRAPPART, S.; FEAUGAS, X.; CREUS, J.; THEBAULT, F.; DELATTRE, L.; MARCHEBOIS, H. **Study of the hydrogen diffusion and segregation into Fe–C–Mo martensitic HSLA steel using electrochemical permeation test.** Journal of physics and chemistry of solids. 2010;71:1467-79.
- FU, A.Q.; CHENG, Y.F. **Electrochemical polarization behavior of X70 steel in thin carbonate/bicarbonate solution layers trapped under a disbonded coating and its implication on pipeline SCC.** Corrosion Science. 2010;52:2511–18.
- HAN, Y.D.; JING, H.Y.; XU, L.Y.; **Welding Heat Input Effect On The Hydrogen Permeation In The X80 Steel Welded Joints.** Materials Chemistry and Physics. 2012;132:216–22.
- HAQ, J. A.; MUZAKA, K.; DUNE, D. P.; CALKA, A.; PERELOMA, E. V. **Effect of microstructure and composition on hydrogen permeation in X70 pipeline steels.** Int J Hydrogen Energy. 2013;38:2544-56.
- ISO 17081.** International Organization for Standardization. Method of measurement of hydrogen permeation and determination of hydrogen uptake and transport in metals by an electrochemical technique. 2004.
- MANOLATOS P.; JEROME M.; THUAL C.D; COZE J.L. **The electrochemical permeation of hydrogen in steels without palladium coating. Part I: interpretation difficulties.** Corrosion Science. 1995;37:1773-83.

- MCBREEN, J.; NANIS, L.; BECK, W. A **Method for Determination of the Permeation Rate of Hydrogen through Metal Membranes**. J. electrochem. Soc. 1966;113:1218-22.
- MOHATI-BONABI, M. A.; SZPUNAR, J. A.; RAZAVI-TOUSI, S. S. **A comparative study of hydrogen induced cracking behavior in API 5L X60 and X70 pipeline steels**. Engineering Failure Analysis. 2013;33:163–75.
- NACE Standard TM0177-2005**. Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments. NACE International, 2005.
- OLDEN, V.; ALVARO, A.; AKSELSEN, O. A. **Hydrogen diffusion and hydrogen influenced critical stress intensity in an API X70 pipeline steel welded joint e Experiments and FE simulations**. Int J of Hydrogen Energy. 2012;37:11474-86.
- OWCZAREK, E.; ZAKROCZYMSKI, T.; **Hydrogen Transport In A Duplex Stainless Steel**. Acta materialia. 2000;48:3059-70.
- TSUJIKAWA, S.; NIYASAKA, A.; JEDA, M.; ANDO, S.; SHIBATA, T.; HARUNA, T.; KATAHIRA, M.; YAMANE, Y.; AOKI, T.; YAMADA, T. **Alternative for Evaluating Sour Gas Resistance for Low-Alloy Steels and Corrosion-Resistant Alloy**. Corrosion. 1993;49:5:409-19.
- XUE, H.B.; CHENG, Y.F. **Hydrogen Permeation and Electrochemical Corrosion Behavior of the X80 Pipeline Steel Weld**. Journal of Materials Engineering and Performance. 2012;22:170-5.
- YAN, M.; WENG, Y. **Study on hydrogen absorption of pipeline steel under cathodic charging**. Corrosion Science. 2006;48:432-44.
- YAZDIPOUR, N.; HAQ, A.J.; MUZAKA, K.; PERELOMA, E.V. **2D modelling of the effect of grain size on hydrogen diffusion in X70 steel**. Computational Materials Science. 2012;56:49-57.
- YEN, S. K.; HUANG, I. B. **Critical Hydrogen Concentration for Hydrogen-Induced Blistering On AISI 430 Stainless Steel**. Materials Chemistry and Physics. 2003;80:662-6.
- ZACROCZYMSKI, T. **Adaptation of the electrochemical permeation technique for studying entry, transport and trapping of hydrogen in metals**, Electrochimica Acta 2006;51:2261.
- ZACROCZYMSKI, T.; SZKLARSKA-SMIALOWSKA, Z.; **Activation of iron surface to hydrogen absorption resulting from a long cathodic treatment in NaOH solution**, Journal of the Electrochemical Society. 1985;132:2548.

