

ISBN: 978-85-8328-451-2



VI SIMPPGES
transição energética

ANAIS DO EVENTO 2025



Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da
Universidade Federal de Santa Catarina

S612a Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade
(6. : 2026 : Araranguá, SC)

Anais do VI Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Energia e
Sustentabilidade [recurso eletrônico] : [transição energética] / comissão
organizadora, Carla de Abreu D'Aquino ... [et al.]. – Araranguá : UFSC,
2026.

198 p.

E-book (PDF)

Inclui os trabalhos apresentados no VI Simpósio do Programa de Pós-
graduação em Energia e Sustentabilidade da UFSC – Campus Araranguá,
realizado nos dias 22 e 23 de outubro de 2025.

ISBN 978-85-8328-451-2

1. Transição energética. 2. Sustentabilidade. 3. Energia-congressos.
I. D'Aquino, Carla de Abreu. II. Título.

CDU: 620.91

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENERGIA E SUSTENTABILIDADE (PPGES - UFSC)**

COMISSÃO ORGANIZADORA: Profa. Dra. Carla de Abreu D'Aquino; Profa. Dra. Elaine Virmond; Prof. Dr. Luiz Fernando Belchior Ribeiro; Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli; Eng.a Ana Paula Cervinski; Eng.a Elaine Ribeiro Grassi; Eng.a Jessika Sumariva Saturno; Arquiteta e Urbanista Katiucia Alf Santos; Ma. Lauanne Oliveira Pimentel; Eng. Lucas Batista Crepaldi; Me. Márcio Gomes Camargo; Ma. Geógrafa Patricia Abade Ferreira.

**ANAIS DO VI SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENERGIA E SUSTENTABILIDADE**

CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE (CTS)

CAMPUS UNIVERSITÁRIO ARARANGUÁ, UFSC, 2026

COMISSÃO ORGANIZADORA DO EVENTO

Docentes:

Profa. Dra. Carla de Abreu D'Aquino (UFSC, CTS, Campus Araranguá)

Profa. Dra. Elaine Virmond (UFSC, CTS, Campus Araranguá)

Prof. Dr. Luiz Fernando Belchior Ribeiro (UFSC, CTS, Campus Araranguá)

Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli (UFSC, CTS, Campus Araranguá)

Discentes do PPGES:

Eng.a Ana Paula Cervinski (UFSC, CTS, Campus Araranguá)

Eng.a Elaine Ribeiro Grassi (UFSC, CTS, Campus Araranguá)

Eng.a Jéssika Sumariva Saturno (UFSC, CTS, Campus Araranguá)

Arquiteta e Urbanista Katiucia Alf Santos (UFSC, CTS, Campus Araranguá)

Ma. Lauanne Oliveira Pimentel (UFSC, CTS, Campus Araranguá)

Eng. Lucas Batista Crepaldi (UFSC, CTS, Campus Araranguá)

Me. Márcio Gomes Camargo (UFSC, CTS, Campus Araranguá)

Voluntários:

Ma. Geógrafa Patricia Abade Ferreira (UFSC, CTS, Campus Araranguá)

EDITORIAL

Considerando o cenário de mudanças climáticas e a progressiva exaustão dos recursos naturais, a transição energética torna-se importante frente aos desafios ambientais, econômicos e sociais nesse contexto. Dessa maneira, o VI Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade (SIMPPGES), realizado nos 22 e 23 de outubro de 2025, na UFSC - Campus Araranguá, promoveu debates e difusão do conhecimento abordando as complexidades da temática "Transição Energética".

O objetivo do VI SIMPPGES foi contribuir para a difusão do conhecimento científico e tecnológico do Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGES), fomentando a integração com a comunidade externa. Além de promover a integração entre estudantes, docentes, pesquisadores, profissionais, empreendedores e representantes dos setores público e privado e da sociedade civil, através das palestras e mesas redondas, e demais ambientes do evento.

O evento foi realizado no formato híbrido, com palestras presenciais, apresentações de trabalhos no formato oral ou banner, e mesas redondas realizadas no formato online. No que se refere à realização do evento e à integração acadêmica, o simpósio contou com 209 inscritos, entre professores, pesquisadores, profissionais do setor, alunos de graduação e pós-graduação e membros da comunidade em geral. Essa participação diversificada possibilitou uma ampla interação entre a academia e a sociedade. Recebeu ainda 36 trabalhos submetidos, sendo 17 pôsteres e 19 apresentações orais. Os pôsteres foram exibidos no *hall* da UFSC durante o Coffee Break, permitindo uma interação próxima entre os pesquisadores de diversos grupos de pesquisa da UFSC e de outras instituições e o público. As apresentações orais proporcionaram ao PPGES uma oportunidade para compartilhar suas pesquisas, criando um ambiente de discussão científica e troca de conhecimentos.

A comissão organizadora agradece o apoio financeiro da Fundação Stemmer para Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (FEESC) e ao Programa Conexões para Inovar.

SUMÁRIO

Panorama da energia nuclear no Brasil e seu potencial na contenção das mudanças climáticas	10
Cibeli Ferro Garcia, Carla de Abreu D'Aquino	
Determinação ótima de montantes de uso do sistema de transmissão – subestações da CELESC no sul catarinense	16
Luís Bernardo Timboni Baran	
Água que ensina: captação da chuva através de cisterna e irrigação sustentável com microcontrolador	22
Ruana Tomaz de Souza, Evandro Machado Pereira	
Implementação de políticas públicas para eficiência energética: avaliação do potencial de uma ação educativa desenvolvida em um acampamento escoteiro	28
Suzete da Luz Teza Batista, Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Mônica Knöpker	
Análise do impacto da integração de veículos elétricos no sistema elétrico de potência	33
Marcos Giehl, Leonardo Bremermann, Giuliano Arns Rampinelli	
Avanços em sistemas híbridos com supercapacitores e baterias para microrredes renováveis: uma revisão integrativa com avaliação tecnológica e econômica	39
Luis Fernando Espinosa Cocian, Analúcia Schiaffino Morales	
Impacto da tecnologia bifacial de módulos fotovoltaicos: sistemas de geração distribuída sob condições operacionais reais	45
Letícia Toretí Scarabelo, Laís Costa Duarte, Giuliano Arns Rampinelli	
Estudo de caso sobre falhas em sistemas fotovoltaicos em ambientes litorâneos: análise da pousada Trilha do Mar – AL	51
Maria de Lourdes Soares de Souza, Marcelo de Assis Corrêa, Eliane dos Santos Ribeiro, João Pinto Cabral Neto, Simone Machado Santos	
Diferentes metodologias para estudo do ambiente escolar como facilitador da aprendizagem	56
Caroline Winke Ávila, Carla de Abreu D'Aquino	
Inteligência artificial aplicada a otimização do posicionamento de turbinas em parques eólicos offshore	61
Italo Firmino da Silva, Guilherme Trajano, Telles Brunelli Lazzarin, Lenon Schmitz, Alison R. Panisson	
Adaptação e resiliência às mudanças climáticas na Ilha do Pavão – Porto Alegre / RS	66
Katiucia Alf Santos, Kátia Cilene Madruga, Márcio Rosa D'Ávila	

Modelagem paramétrica e fabricação aditiva de turbinas eólicas de pequeno porte: uma proposta para a transição energética inclusiva	71
Andrei Leandro Morsch Franco, Carla de Abreu D'Aquino, Luciano Lopes Pfitscher, Maicon Coelho Evaldt	
Desenvolvimento de metodologia de separação química dos materiais componentes de módulos fotovoltaicos	77
Halley Welther Jacques Dias, Renato Diaz de Santa Helen, Letícia Toreti Scarabelot, Inácio Augusto Ignesi Acordi, Gustavo Leopodino Costa, Ana Laura de Souza Teixeira	
Aplicação de materiais fotocatalíticos no tratamento de contaminantes emergentes em água	83
Henrico Junior Schossler, Carlos Rafael Silva de Oliveira, Carla de Abreu D'Aquino, Luiz Fernando Belchior Ribeiro, Afonso Henrique da Silva Júnior	
Resíduos agrícolas como precursores para adsorventes e suportes catalíticos aplicados no tratamento de efluentes	88
Vitor Casarin Fernandes, Henrico Junior Schossler, Carlos Rafael Silva de Oliveira, Leandro Pellenz, Carla de Abreu D'Aquino, Natália Ueda Yamaguchi, Luiz Fernando Belchior Ribeiro, Afonso Henrique da Silva Júnior	
O pensamento econômico ecológico contemporâneo e suas conexões com o método emergia: uma ferramenta para a gestão sustentável de recursos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ)	93
Julio Cesar Lopes Borges, Carla de Abreu D'Aquino, Oldemar Carvalho Júnior	
Caracterização físico-química de misturas de carvão mineral e combustível derivado de resíduos sólidos urbanos visando à co-combustão como alternativa para transição energética na região sul catarinense	98
Márcia de Fátima Suquica Panzo, Everton Sidnei Renner, Thiago Fernandes de Aquino, Elise Sommer Watzko, Elaine Virmond	
Eletrodos a base de óxido de grafeno visando aplicação como ânodo em Células de Combustíveis Microbiológicas: uma revisão	103
Ana Paula Cervinski, Elaine Virmond, Elise Sommer Watzko	
Proposta de unidade de ensino potencialmente significativa (UEPS) voltado às energias renováveis no contexto da escola pública no município de Araranguá, SC	108
Carina Ferraz Marcos, Carla de Abreu D'Aquino, Juarez Bento da Silva, Katia Cilene Rodrigues Madruga	
Eletrodos baseados em biochar para produção de hidrogênio por eletrólise de água: uma revisão com foco em biomassa de arroz	113
Gessica Candiottto Possamai, Afonso Henrique da Silva Júnior, Luiz Fernando Belchior Ribeiro	
Determinação do band gap óptico de nanocompósitos $\text{TiO}_2/\text{FeS}_2/\text{SiOC}$ para aplicações fotocatalíticas	118
Olavo Antonio de Oliveira, Abel Augusto Nanza, Tiago Elias Allievi Frizon, Luiz Fernando Belchior Ribeiro	

Agroenergia e pesticidas: principais contaminantes da água em culturas de importância energética	
Jennifer Rodrigues, Gessica Candiottto Possamai, Carla de Abreu D'Aquino, Luiz Fernando Belchior Ribeiro, Afonso Henrique da Silva Júnior	123
Potencial da pirita como fotocatalisador em aplicações ambientais e energéticas: revisão bibliométrica	
Emily Beatriz Nagildo, Natália Ueda Yamaguchi, Luiz Fernando Belchior Ribeiro, Afonso Henrique da Silva Júnior	128
Análise comparativa da irradiância solar em sistemas fotovoltaicos monocristalinos: tecnologias monofacial versus bifacial	
Jonathan Maceda Silveira, Giuliano Arns Rampinelli	133
Modelo de veículos elétricos para análise da adequação de sistemas de geração com grande integração de fontes renováveis	
Aline Rodrigues, Leonardo Elizeire Bremermann, Giuliano Arns Rampinelli	138
Implementação de políticas públicas de eficiência energética por meio de um <i>podcast</i> sobre permacultura	
Patricia Abade Ferreira, Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Mônica Knöpker	143
Pesquisa rápida sobre o tema energia renovável e educação utilizando ferramenta de inteligência artificial	
Alessandra Bez Birolo, Carla Abreu D'Aquino	148
A foto(eleto)catálise do glicerol na geração de hidrogênio verde: uma revisão	
Jéssika Sumariva Saturno, Elaine Virmond, Elise Sommer Watzko	153
Desempenho de sistema fotovoltaico com arranjos em diferentes orientações: análise a partir de dados reais de operação	
Letícia Toreti Scarabelot, Hélen Farias Fávaro, Giuliano Arns Rampinelli	158
Economia circular em módulos fotovoltaicos: desafios e perspectivas	
Kamylle Gasperin, Jonathan Tonello, Letícia Toreti. Scarabelot, Leonardo Elizeire. Bremermann	163
Hidrogênio verde via eletrólise da água: análise comparativa de tecnologias	
Scandolara, I. C. W., Rando, J. V., Souza, R. R. M., Da Silva Júnior, A. H., Belchior, L. F.	168
Energia e meio ambiente com realidade aumentada: oficinas de extensão nas escolas públicas de Santa Catarina	
Davi Pereira Sampaio, Ana Paula Cervinski, Lucas Batista Crepaldi, Vinícius Antônio Oliveira Cosmam, Jéssika Sumariva Saturno, Ananda Shanti Saad Cipolat, Elise Sommer Watzko, Eliane Pozzebon, Elaine Virmond	173
Educação ambiental para a gestão e governança das águas: estudo de caso na bacia do Rio Araranguá, sul de Santa Catarina, Brasil	
Simoni Daminelli Vieira, Carlyle T. B. de Menezes, Ana Paula de Matos	178

Valorização de óleos de fritura usados para produção de biodiesel: revisão de processos, estudos de caso e perspectivas sustentáveis 184

Julian Alfredo Cuzco Terrones, Afonso Henrique da Silva Júnior, Luiz Fernando Belchior Ribeiro, José César Ramos Saravia

Transição energética para sistemas de geração de calor: substituição de combustíveis convencionais por hidrogênio de baixa emissão de carbono

Lucas Batista Crepaldi, Vinicius Antônio de Oliveira Cosmam, Elaine Virmond, Elise Sommer Watzko 189

Desempenho de longo prazo de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em climas europeus: estudo de Delft e Brastislava (2010-2024)

Diowana Mello de Oliveira, Giuliano Arns Rampinelli 194

PANORAMA DA ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL E SEU POTENCIAL NA CONTENÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Cibeli Ferro Garcia¹, Carla de Abreu D'Aquino²

¹ Curso de Graduação em Engenharia de Energia/Universidade Federal de Santa Catarina/cibelifgarcia@gmail.com

² Departamento de Energia e Sustentabilidade/Universidade Federal de Santa Catarina/carla.daquino@ufsc.br

Resumo: *Este trabalho investiga como a energia nuclear pode contribuir para reduzir as mudanças climáticas, enfatizando seu papel como alternativa de geração sem emissão de gases de efeito estufa (GEEs). Através de revisão teórica, apresentam-se os fundamentos da energia nuclear, seus impactos e perspectivas, bem como sua participação atual e futura na matriz elétrica nacional. O estudo aborda também os principais aspectos das mudanças climáticas no Brasil, incluindo principais setores emissores e eventos extremos e sua relação com a fonte nuclear. Conclui-se que, apesar de desafios políticos, econômicos e sociais, a energia nuclear tem potencial para complementar fontes renováveis e contribuir para um modelo energético de baixo carbono.*

Palavras-chave: *energia nuclear; mudanças climáticas; Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energia que atendam à crescente demanda e que reduzam as emissões de gases de efeito estufa é central nas discussões sobre mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, a energia nuclear surge como opção de baixa emissão de carbono, capaz de fornecer grandes quantidades de energia de forma constante, embora sua trajetória tenha sido marcada por acidentes como o de Chernobyl (1986) e de Fukushima Daiichi (2011), que reforçaram padrões de segurança e influenciaram sua percepção mundial.

No Brasil, onde a matriz elétrica é majoritariamente renovável, a ampliação do uso de usinas nucleares gera debates sobre segurança, viabilidade econômica, impactos ambientais e aceitação social. A Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto reúne as três usinas do país: Angra 1 (640 MW, 1985), Angra 2 (1.350 MW, 2001) e Angra 3 (1.405 MW). Apesar de seu papel estratégico para metas climáticas, a energia nuclear ainda tem pouca relevância política, cabendo ao meio acadêmico destacar seu potencial. Este trabalho explora a energia nuclear no Brasil e sua relação com as mudanças climáticas, considerando fundamentos, histórico, contribuições, impactos e potencial de mitigação.

2 METODOLOGIA

Os critérios de seleção das obras adotadas no trabalho foram a data de publicação, maior quantidade de palavras-chave inseridas no título, conjuntura e enquadramento do documento no contexto do tema pesquisado, a partir da leitura parcial do mesmo. A data de publicação foi delimitada pelo período entre 2014 e 2025.

Os principais portais acessados para a consulta eram públicos e gratuitos: Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Scientific Electronic Library Online (SciELO). Durante a pesquisa foram utilizadas principalmente as palavras-chave: Brasil, energia nuclear, mudanças climáticas (e também em inglês, *nuclear energy* e *climate change*).

A bibliografia cinzenta foi encontrada utilizando o mecanismo de busca do Google, procurando documentos recentes publicados por órgãos governamentais, como: International Atomic Energy Agency (IAEA), Eletronuclear e Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 A energia nuclear

A energia nuclear é gerada a partir de reações no núcleo dos átomos, liberando grande quantidade de calor, aproveitada para produzir energia elétrica nas usinas nucleares. O procedimento mais utilizado é o de fissão nuclear, onde o núcleo de um átomo instável, geralmente urânio-235, é bombardeado por nêutrons e se divide, liberando outros nêutrons que mantêm a reação em cadeia (Murray, 2020; NRC, 2021).

As usinas nucleares possuem processos semelhantes às termoeletricas, porém a fonte de calor é a reação nuclear e possuem adicionalmente uma arquitetura de contenção para proteger o ambiente externo da radiação. O reator mais utilizado no mundo é o Reator de Água Pressurizada (PWR) (IAEA, 2024), adotado em Angra 1, 2 e 3 (EPE, 2020).

3.2 Impactos da energia nuclear

Como fonte principal sobre os impactos da energia nuclear, foram utilizados os autores Adar (2021), Hanif *et al.* (2020) e Kosai; Unesaki (2024). A literatura evidencia percepções sociais ambivalentes entre benefícios e riscos. Ambientalmente, destacam-se a redução de emissões de gases de efeito estufa, menor poluição atmosférica e ocupação de área reduzida em comparação às termoeletricas. Por outro lado, a contaminação por radiação e o longo período de armazenamento de resíduos geram percepções negativas.

Em termos de recursos e economia, reconhece-se o elevado potencial energético e a abundância de urânio, com custos operacionais relativamente baixos, mas altos investimentos iniciais e riscos do combustível limitam a expansão. Operacionalmente,

a energia nuclear é valorizada por sua estabilidade, disponibilidade contínua e longa vida útil das instalações, embora enfrente complexidade técnica e gestão onerosa dos resíduos. Ainda que a tecnologia apresente baixos riscos de acidentes quando bem controlada, questões ligadas à proliferação nuclear, à ocorrência de desastres passados e à baixa aceitação pública consolidam percepções majoritariamente negativas.

3.3 Energia nuclear no Brasil

O histórico da energia nuclear no Brasil se inicia no período de 1943 a 1950 com sua participação indireta no Projeto Manhattan, através da exportação de minerais atômicos. Em 1955, foi estabelecido o Acordo Brasil–EUA no programa Átomos para a Paz, com a chegada do primeiro reator de pesquisa no país. Após 20 anos, é assinado o Acordo Brasil–Alemanha (1975) para construção de 8 usinas. Apenas 2 das 8 usinas, Angra 1 e 2, foram efetivamente construídas. Em 1997 foi fundada a Eletronuclear, atual responsável pela operação e construção de usinas nucleares no Brasil. A terceira usina, Angra 3, está com as obras paralisadas desde 2015 (Machado, 2021).

Recentemente, conforme o Balanço Energético Nacional da EPE (2024), em 2024, a contribuição da fonte nuclear na matriz elétrica brasileira foi de 1,9%. Sobre o futuro da energia nuclear no Brasil, não há certezas. A trajetória desse setor sempre esteve lado a lado com o momento econômico e o governo vigente no país. Para um curto prazo, existe a previsão do início da operação de Angra 3 em 2031, de acordo com o Plano de Negócios e Gestão 2025–2029 da Eletronuclear (2024). Isso acrescentará cerca de 1.405 MW de potência elétrica instalada.

3.4 Mudanças climáticas no Brasil

Conforme Ambrizzi (2021), as mudanças climáticas são definidas como mudanças de longo prazo em variáveis climáticas, ocorrendo por fatores antropogênicos e naturais, e gerando efeitos nos sistemas geofísicos, naturais e humanos. O Brasil, pela sua ampla cobertura florestal, tem papel relevante no cumprimento das metas climáticas: entre 2013 e 2022 registrou a maior taxa de emissão líquida de CO₂ por mudanças no uso do solo (1,1 bilhão tCO₂/ano), o que evidencia o potencial de medidas de proteção florestal e de combate ao desmatamento para reduzir emissões de GEEs (Coelho, 2024).

4 DISCUSSÃO

Para atingir as metas de emissão zero, serão necessárias todas as tecnologias

de baixo carbono, e a energia nuclear oferece um potencial relevante nesse cenário. Atualmente, mais de $\frac{1}{4}$ da eletricidade de baixo carbono mundial é nuclear, que nos últimos 50 anos evitou cerca de 70 Gt de CO₂ e continua evitando 1 Gt por ano. Suas emissões médias são de 10 gCO₂/kWh, contra 500-1000 gCO₂/kWh do gás natural e carvão (IAEA, 2024).

Além das baixas emissões, a nuclear consome menos recursos, tem menor toxicidade e impacto por unidade de energia, e mostra resiliência frente a eventos climáticos extremos. Também contribui para a segurança energética (Durdovic *et al.*, 2024), embora acidentes como Fukushima tenham enfraquecido o apoio público.

A expansão nuclear, porém, enfrenta riscos ligados às mudanças climáticas, como estresse hídrico e elevação do nível do mar, exigindo infraestrutura adaptada (Portugal-Pereira *et al.*, 2024). Ainda que não seja renovável, apresenta baixo impacto durante a operação e potencial de mitigação, o que justifica sua inclusão na transição energética, apesar dos resíduos radioativos (Pienkowski, 2024).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conjuntura da energia nuclear no Brasil é, no mínimo, controversa: ela garante geração contínua e mais segurança ao sistema elétrico, mas permanece não renovável, depende parcialmente de urânio importado, gera rejeitos radioativos de longa duração e enfrenta altos custos. Seu desenvolvimento segue condicionado a decisões políticas e econômicas.

Apesar disso, suas emissões ao longo do ciclo de vida são muito baixas, tornando-a aliada na redução de GEEs e na substituição de fontes fósseis, embora não seja uma solução definitiva. No Brasil, onde a matriz já é predominantemente renovável e as emissões vêm sobretudo do uso da terra, o desafio está em manter protocolos rigorosos de segurança, aprimorar a comunicação com a sociedade e assegurar a efetiva execução dos compromissos climáticos.

REFERÊNCIAS

- ADAR, E. The state of the art of nuclear energy and its bibliometric analysis. **Environmental Research & Technology, Artvin**, v. 4, n. 2, p. 1023107, 30 jun. 2021.
- AMBRIZZI, T.; REHBEIN, A.; DUTRA, L. M. M.; CRESPO, N. M. **Mudanças climáticas e a sociedade**. São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, 2021.

COELHO, C. A. W. et al. **Mudança do clima no Brasil**: síntese atualizada e perspectivas para decisões estratégicas. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2024. 106 p. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/arquivos/Relatorio_Mudanca_Cl ima_Brasil.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/arquivos/Relatorio_Mudanca_Cl%20ima_Brasil.pdf). Acesso em: 12 jun. 2025.

DURDOVIC, M.; TURCANU, C.; SALA, R.; GEYSMANS, R.; LÓPEZ-ASENSIO, S.; GONÇALVES, L. The outlooks of nuclear energy in society: Unraveling public attitudes in the context of climate and energy security challenges. **Progress in Nuclear Energy**, v. 174, 105286, 2024.

ELETRONUCLEAR. **Relatório Anual Eletronuclear 2024**. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: [https://www.eletronuclear.gov.br/Quem-Somos/Governanca/Documents/Relatorios-A nuais/Eletronuclear_RS_2024-FINAL.pdf](https://www.eletronuclear.gov.br/Quem-Somos/Governanca/Documents/Relatorios-A%20nuais/Eletronuclear_RS_2024-FINAL.pdf). Acesso em: 29 maio 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2024**: Ano Base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2050: relatório final**. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2025.

HANIF, M. A.; NADEEM, F.; BHATTI, I. A.; TAUQEER, H. M. Non-renewable energy resources. In: MEYERS, Robert A. (Ed.). **Environmental Chemistry: A Comprehensive Approach**. Hoboken, NJ: Wiley, 2020. p. 531-554.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Nuclear Power Reactors in the World 2024**. Edition. 2024. Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/15748/nuclear-power-reactors-in-the-world>. Acesso em: 13 out. 2024.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **What is nuclear energy?: The science of nuclear power**. 2024. Disponível em: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-energy-the-science-of-nuclear-power>. Acesso em: 7 abr. 2024.

MACHADO, T. B. **Aceitação da energia nuclear por parte da opinião pública no Brasil**. 2021. 233 f. Tese (Doutorado em Ciências da Comunicação) – Escola de Comunicações e Artes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

MURRAY, R. L.; HOLBERT, K. E. **Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes**. 8. ed. Kidlington: Elsevier, 2020.

PIENKOWSKI, D. Is nuclear energy really sustainable?: A critical analysis on the example of the Polish energy transition plan. **Energy for Sustainable Development**, v. 78, 101376, 2024.

PORTUGAL-PEREIRA, J., ESTEVAN, M., ARAÚJO, K. (2024). Exposure of future nuclear energy infrastructure to climate change hazards: a review assessment. **Energy Strategy Reviews**, 53, 101365.

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (NRC). Radioactivity. [S. l.], 9 mar. 2021. Disponível em: <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/radioactivity.html>. Acesso em: 3 jul. 2025.

DETERMINAÇÃO ÓTIMA DE MONTANTES DE USO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO – SUBESTAÇÕES DA CELESC NO SUL CATARINENSE

Luís Bernardo Timboni Baran

CELESC/luisbtb@celesc.com.br

Resumo: As regras definidas pela Resolução Normativa 666/2015 trazem incentivos e penalidades as Distribuidoras no processo de contratação de montantes de uso do sistema de transmissão junto ao Operador Nacional do Sistema - ONS. Nesse contexto, cabe aos agentes considerarem perspectivas de operação para contratar junto ao ONS tais montantes, dando sinal adequado a expansão do sistema de transmissão. Este artigo propõe a analisar as referidas regras, apresentando um modelo de otimização, suportado por cenários de projeção, que simulam o impacto financeiro das distribuidoras e visa minimizar o valor global considerando critérios operativos, regulatórios e de captação financeira. Assim, vislumbra-se importante ferramenta de apoio à definição de estratégias de contratações de Montantes para a Distribuidora nos pontos de Fronteira com a Rede Básica.

Palavras-chave: MUST; Conexão; Rede Básica

1 INTRODUÇÃO

A regulação da conexão da rede básica teve evolução desde a Resolução ANEEL nº 66/1999, que definiu a composição da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional. Posteriormente, as Resoluções nº 281/1999, nº 399/2010 e nº 666/2015 estabeleceram as condições de acesso, contratação e penalidades relativas ao uso do sistema de transmissão.

O Montante de Uso do Sistema de Transmissão (MUST), definido em contratos de uso – CUST –, corresponde à máxima demanda anual de potência contratada por unidades consumidoras e distribuidoras. O valor deve ser declarado anualmente ao Operador Nacional do Sistema (ONS) e determina os Encargos de Uso do Sistema de Transmissão (EUST), compondo um custo relevante do setor elétrico.

Para a Celesc Distribuição, concessionária que atende o estado de Santa Catarina e possui 19 pontos de conexão à Rede Básica, a correta definição dos MUST impacta diretamente sua saúde financeira e os encargos repassados aos consumidores. Este trabalho sintetiza os aspectos regulatórios e metodológicos envolvidos na contratação e apresenta estudo aplicado a dois pontos de fronteira do sistema.

2 METODOLOGIA

A definição do Montante de Uso do Sistema de Transmissão (MUST) é resultado da combinação entre projeções de demanda de carga, restrições técnicas de rede e regras regulatórias estabelecidas pela ANEEL. Para sistematizar o processo de análise, a

metodologia foi organizada em quatro etapas principais: (i) projeção de carga; (ii) modelagem matemática e custos associados; (iii) simulações de fluxo de potência; e (iv) aplicação ao estudo de caso.

As projeções de carga foram elaboradas com horizonte de quatro anos, considerando as premissas de crescimento econômico, indicadores setoriais e variáveis climáticas. Foi utilizado o software Forecast Pro for Windows (FPW), que permite ajustes por séries temporais, regressões múltiplas e modelos de suavização exponencial.

Três cenários de evolução da demanda foram definidos: Cenário otimista; Cenário central; e cenário pessimista. Cada cenário foi considerado com probabilidade de ocorrência de 1/3, permitindo avaliar não apenas o valor esperado, mas também a dispersão de custos associados a diferentes condições de mercado.

A formulação da função objetivo buscou a minimização do custo total de contratação do MUST em cada ponto de conexão.

A modelagem foi implementada em planilhas de cálculo com otimização via Solver do Excel, garantindo aplicabilidade prática para distribuidoras que não dispõem de ferramentas avançadas de programação matemática.

As projeções de carga foram validadas por meio de simulações de fluxo de potência nos pontos de fronteira. Utilizou-se o banco de casos disponibilizado pelo ONS, com atualização para o horizonte 2019. A consideração desses parâmetros foi essencial para evitar contratações economicamente atrativas, mas inviáveis do ponto de vista técnico.

A parcela de ineficiência de ultrapassagem – PIU, anual, poderá ser expressa conforme equações (1) e (2):

$$PIU_{i,a,p}^{Ano} = \sum_{m=1}^{12} PIU_{i,a,m,p}^{Mês} \quad (1)$$

$$PIU_{i,a,m,p}^{Mês} = 3 * Tar_{i,a,p} * \max[(Med_{i,a,m,p} - 1,1 * Ct_{i,a,p}); 0] \quad (2)$$

$PIU_{i,a,p}^{Ano}$ - custo da parcela de ineficiência de ultrapassagem anual; no ponto i , no ano a e posto tarifário p .

$PIU_{i,a,m,p}^{Mês}$ - custo da parcela de ineficiência de ultrapassagem mensal; no ponto i , no ano a , mês m e posto tarifário p .

Relativo a apuração de eficiência da sobrecontratação de uso do sistema de transmissão apurada pelo ONS, por horário de contratação e ponto de conexão: anualmente, caracterizada pela medição máxima do de demanda em valor inferior a 90% do contrato, conforme equação (3).

$$PIS_{i,a,p}^{Ano} = 12 * Tarifa_{i,a,p} * [0,9 * (Med_{i,a,p} - Ct_{i,a,p}); 0] \quad (3)$$

$Med_{i,a,p}$ - representa o máximo fluxo no ponto de conexão i , ano a e posto tarifário p .

Avaliando, de outro lado os impactos financeiros, decorrentes do descasamento do processo tarifário, temos os seguintes custos para captação conforme equação (4):

- Prazo: 8 meses;
- Taxa de Juros: cdi + 2,5% a.a. (Aproximadamente 7% de janeiro até Agosto);
- Fee (Comissões): 1,50%.

$$C Cap_{i,a,p}^{Empre} = [(Ct_{i,a,p} - Ct_{i,a-1,p}); 0] + [(Ct_{i,a,p} - Ct_{i,a-1,p}); 0] \quad (4)$$

$C Cap_{i,a,p}^{Empre}$ - é o valor que será pago de juros e comissão que devem ser arcados pela concessionária caso decida fazer contratação adicional.

$Ct_{i,a-1,p}$ - é o valor contratado no ponto i , ano $a-1$ (ano anterior) e posto tarifário p (soma dos valores referente $MUST_{flexível}$ e $MUST_{permanente}$)

O custo total envolverá valores de contratação que serão repassados aos clientes, as parcelas de ineficiência – caso ocorram – e o custo de captação incremental caso a Distribuidora eleve sua contratação. De maneira global, a ideia é contratar com vistas a reduzir os valores de Parcelas de Ineficiência e reduzindo ao máximo os valores de captação, conforme equação (5).

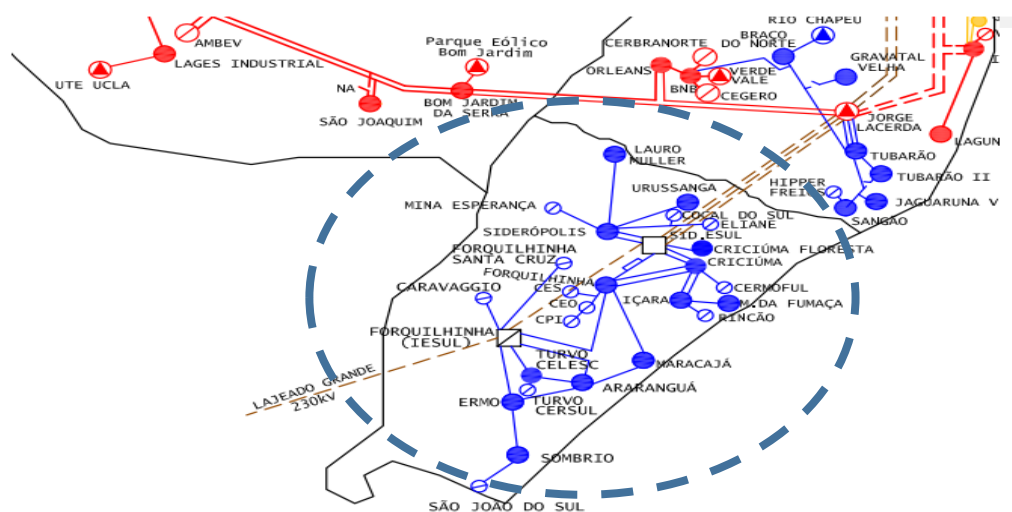
$$Custo_{i,a,p}^{Total} = C B_{i,a,p}^{CONTR} + C Cap_{i,a,p}^{Empre} + PIU_{i,a,p}^{Ano} + PIS_{i,a,p}^{Ano} \quad (5)$$

Então do ponto de vista de otimização, pretendemos reduzir os aspectos, anteriormente detalhados, considerando cenários de ocorrência da demanda, conforme minimização estipulada em (6).

$$\begin{aligned} \min = & a_1 Custo_{i,a,p}^{Total Otimista} + a_2 Custo_{i,a,p}^{Total Central} + a_3 Custo_{i,a,p}^{Total Pessimista} \\ & s.a \\ & Ct_{i,a,p} \leq \text{Demanda Máxima do Ponto} \\ & Ct_{i,a,p} \geq 0,9 * Ct_{i,a-1,p} \quad (6) \\ & a_n = \text{Probabilidade do cenário} \end{aligned}$$

O modelo foi aplicado a dois pontos de conexão da Celesc: Forquilha e Siderópolis, selecionados por apresentarem características de rede isolada em relação ao restante da rede da distribuidora, o que facilita a análise individualizada.

Figura 01 – Diagrama Subestações 230/69 Forquilha e Siderópolis



Fonte: própria 2025

Foram utilizados dados históricos de 2010 a 2018 de carga medida e montantes contratados, além das tarifas de EUST divulgadas pela ANEEL para o ciclo de 2019. O horizonte de análise foi restrito a um ano (2019), de modo a avaliar a consistência da metodologia em escala piloto antes de expansão para todos os 19 pontos de fronteira da distribuidora.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os históricos de contratação e medição entre 2010 e 2018 mostraram diferenças relevantes entre demanda contratada e efetivamente registrada. Para 2018, por exemplo, os valores contratados foram:

- Siderópolis: 180 MW (ponta) e 235 MW (fora ponta);
- Forquilha: 90 MW (ponta) e 130 MW (fora ponta).

A aplicação do modelo de otimização gerou os seguintes resultados para 2019:

- Forquilha: contratação ótima de 121,48 MW, com custo total estimado de R\$ 6,54 milhões;
- Siderópolis: contratação ótima de 138,31 MW (ponta) e 237,44 MW (fora ponta), com custo de R\$ 21,2 milhões.

Os resultados evidenciam que a definição ótima do MUST reduz custos com ineficiências e minimiza riscos de penalidades. Além disso, a comparação entre cenários de demanda mostra que o peso atribuído a cada cenário influencia a estratégia de

contratação. Empresas públicas, por exemplo, podem priorizar a minimização de penalidades, enquanto empresas privadas podem assumir maior risco em busca de menores custos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma síntese dos principais aspectos de contratação e gestão do MUST destacando a existência de complexidades em aspectos da contratação já que a declaração de MUST está associada a saúde financeira da Distribuidora de Energia.

As experiências de contratação e cenários de projeção levam a impactos significativos, e considerar aspectos de contratação, ineficiências e captação financeira aumentam a complexidade do modelo adotado.

Diante do exposto, verifica-se que a modelagem do problema é o maior impacto na definição dos montantes a serem declarados. Além disso, constata-se uma dificuldade em criar cenários de projeção de demanda para os pontos já que para análise do MUST é utilizado o maior valor de demanda, integralizado em quinze minutos.

Espera-se que os exemplos e situação prática apresentados neste artigo possam iniciar discussões nas empresas de otimização na contratação, e possíveis aperfeiçoamentos regulatórios.

Idealizou-se neste artigo cenários, onde os agentes de decisão podem considerar pesos aos diferentes cenários; trazendo uma análise de risco conforme perfil empresarial. Ou seja, uma empresa pública pode considerar maiores efeitos de penalidade que uma privada; diante desse cenário pode considerar mais pesos aos cenários extremos.

Para os próximos trabalhos, sugere-se uma melhor formatação do código para ajustar de maneira mais eficiente o problema. Além disso, vislumbra-se a possibilidade de expandir a análise para os 19 pontos de fronteira da Distribuidora, e considerar aspectos operativos vinculados a topologia, além de expandir a projeção para os quatro anos de contratação do MUST.

Um outro ganho possível, numa futura metodologia, seria considerar infinitos cenários de acordo com sua probabilidade de ocorrência, assim teríamos uma função distribuição ponderando possíveis valores de contratação.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução nº 666. Brasil, 3 abr. 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015666.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2019.

COLUMBUS, L. 2015 Roundup of 3D printing market forecasts and estimates. 2015. Disponível em: <<http://www.forbes.com/sites/louiscolumbus/2015/03/31/2015-roundup-of-3d-printing-market-forecasts-and-estimates/-17d0d5961dc6>>. Acesso em: 23 abr. 2019.

DARBELLAY, G. A.; SLAMA, M. Forecasting the short-term demand for electricity. *International Journal of Forecasting*, v. 16, p. 71–83, 2000.

LORENZO, H. C. **O Setor elétrico Brasileiro: Passado e Futuro**. Perspectivas: Revista de Ciências Sociais (UNESP. Araraquara. Impresso), São Paulo, v. 24–25, p. 147–170, 2003.

MATTAR, C. M. **Determinação Ótima dos Montantes de Uso de Sistemas de Transmissão: Uma Abordagem Probabilística**. 2007. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

MAXWELL, J. Clerk. **A Treatise on Electricity and Magnetism**. 3. ed. v. 2. Oxford: Clarendon, 1892. p. 68–73.

ÁGUA QUE ENSINA: CAPTAÇÃO DA CHUVA ATRAVÉS DE CISTERNA E IRRIGAÇÃO SUSTENTÁVEL COM MICROCONTROLADOR

Ruana Tomaz de Souza¹, Evandro Machado Pereira²

¹ Secretaria de Estado da Educação/EEB Professora Isabel Flores Hubbe/ruanatomaz@hotmail.com

² Universidade Federal de Santa Catarina/Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Informação e Comunicação/evandromachadopereira@hotmail.com

Resumo: O uso de cisternas sustentáveis pode ser integrado em ambientes escolares, promovendo tanto a sustentabilidade quando a educação dos alunos sobre questões ambientais. O projeto tem como objetivo principal desenvolver um sistema de captação de água e aproveitamento da água da chuva por meio de construção de uma cisterna sustentável automatizada com microcontroladores, visando a irrigação da horta escolar e promovendo a conscientização ambiental, o uso responsável da água e a integração entre educação, sustentabilidade e tecnologia tentando concluir o que o Plano Nacional sobre Mudanças no Clima (PNMC) descreve como seus objetivos: Promover a educação ambiental e climática em todos os níveis de ensino, além de apoiar iniciativas de escolas e comunidades que promovam a economia de recursos naturais, o uso responsável da água, energia e redução de emissão de gases de efeito estufa. O estudo iniciou com um levantamento bibliográfico, seguido por um estudo de natureza qualitativa; para contemplar o planejamento da pesquisa o tema foi relacionado com a água, tecnologia, mudanças climáticas e sustentabilidade. A proposta realizada pelos alunos foi a construção de uma cisterna sustentável que pudesse armazenar água para a irrigação da horta escolar e que está fosse automatizada. A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), por meio do Laboratório de Experimentação Remota (RExLab), contribuiu significativamente com o projeto, em especial na parte tecnológica. A parceria possibilitou o acesso a conhecimentos, recursos e orientações técnicas voltadas à automação do sistema de irrigação com microcontroladores, fortalecendo a integração entre educação básica e ensino superior, e promovendo práticas pedagógicas inovadoras sustentadas pela tecnologia. Concluiu-se então, que ações como essas são fundamentais para o desenvolvimento de cidadãos críticos, que observam a problemática ambiental e criam soluções para ela. Além de que o envolvimento de maneira ativa dos alunos ao projeto, fez com que levassem para suas casas ideias que envolvem o reaproveitamento de água por meio da cisterna.

Palavras-chave: Água; Tecnologia; Microcontrolador; Cisterna; Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural indispensável à vida no planeta Terra. Possui um enorme valor econômico, ambiental e social, sendo fundamental à sobrevivência do ser humano e dos ecossistemas (SACHS, 1993). A construção de uma cisterna sustentável na escola tem como objetivo principal promover o uso consciente e eficiente da água, especialmente em tempos de crise hídrica e mudanças climáticas que afetam diretamente o acesso a esse recurso essencial (BRASIL, 2008; DEFESA CIVIL DE SANTA CATARINA, 2021).

A cisterna será utilizada para captar e armazenar a água da chuva, contribuindo para a irrigação da horta escolar e fortalecendo práticas sustentáveis no ambiente educacional. Além de reduzir o consumo de água potável, o projeto busca estimular a consciência ambiental entre os estudantes, envolvendo-os ativamente na criação e manutenção de soluções ecológicas (JACOBI, 2005; ONU, 2015).

Para tornar o sistema mais eficiente e tecnológico, será incorporado o uso de um microcontrolador, que permitirá a automação da irrigação. Sensores de umidade do solo e

de nível da água na cisterna serão integrados ao sistema, garantindo que a irrigação ocorra apenas quando necessário, evitando desperdícios e otimizando o uso da água armazenada. Essa abordagem alia práticas sustentáveis ao uso de tecnologias acessíveis e educativas, promovendo a inovação dentro do ambiente escolar (HECK et al., 2016).

Essa iniciativa une educação ambiental, inovação tecnológica e sustentabilidade, promovendo a aprendizagem prática, o protagonismo estudantil e o compromisso com a justiça climática. O projeto traz como objetivo geral: desenvolver um sistema de captação e aproveitamento da água da chuva por meio da construção de uma cisterna sustentável automatizada com microcontrolador, visando à irrigação da horta escolar e promovendo a conscientização ambiental, o uso responsável da água e a integração entre educação, sustentabilidade e tecnologia (ONU, 2015; JACOBI, 2005).

E, visando atingir o objetivo geral desta pesquisa, pretende-se:

- Construir uma cisterna sustentável para captação e armazenamento da água da chuva em ambiente escolar (BRASIL, 2008; DEFESA CIVIL DE SANTA CATARINA, 2021);
- Desenvolver um sistema de irrigação automatizado utilizando um microcontrolador e sensores de umidade do solo e de nível de água (HECK et al., 2016);
- Integrar conhecimento de diferentes áreas do currículo escolar (como Ciências, Arte, Inglês, Matemática e Tecnologia) em uma proposta interdisciplinar (JACOBI, 2005);
- Aproximar a educação básica do Ensino Superior por meio da colaboração com o RexLab/UFSC (HECK et al., 2016);
- Contribuir para a manutenção da horta escolar, garantindo uma irrigação eficiente e sustentável;
- Estimular nos estudantes a consciência crítica sobre o uso da água e a importância da sustentabilidade (SACHS, 1993; ONU, 2015).

2 METODOLOGIA

O estudo iniciou com um levantamento bibliográfico, seguido por um estudo de natureza qualitativa; para contemplar o planejamento da pesquisa o tema foi relacionado com a água, mudanças climáticas, sustentabilidade e tecnologia.

Como instrumento para diagnosticar o que os alunos entendem por sustentabilidade, voltado para o tema água, foram feitos questionamentos de como tornar a escola um ambiente mais sustentável?

Ao final, os dados coletados com a pesquisa/propostas foram analisados e, a partir delas, foi possível identificar quais alternativas poderiam ser feitas dentro da escola e da comunidade, propondo soluções para a problemática.

A proposta discutida pelos alunos e a apresentada por eles para a solução, foi a criação de uma cisterna que pudesse armazenar a água e automatizar a irrigação da horta escolar.

Para a construção da cisterna, foram feitas aulas de compreensão do funcionamento de uma cisterna e levantamento dos materiais necessários para a sua produção, que posteriormente foi possibilitada pela compra desses materiais com recursos da escola, resultando na cisterna que pode ser observada na imagem abaixo.

Figura 1 - Cisterna



Foto: autores, 2025.

A cisterna foi montada com os alunos e a ajuda de um amigo da escola que utilizou suas ferramentas para montagem da cisterna. A fim de compreender o objetivo da interdisciplinaridade as paredes do espaço foram pintadas pelos alunos sob a orientação da professora de Arte Kelly que colaborou com o projeto.

O envolvimento do Ensino Superior no projeto se fez pela parceria com o laboratório RexLab da UFSC que montou um protótipo e emprestou os dispositivos

eletrônicos não disponibilizados pela escola, como a placa controladora ESP32, o sensor de umidade do solo e uma válvula solenoide.

O protótipo desenvolvido baseia-se em uma arquitetura de Internet das Coisas (IoT) distribuída, utilizando um microcontrolador ESP32 responsável pela leitura dos níveis de umidade do solo através de um sensor capacitivo e pelo envio desses dados via requisições HTTP POST para um servidor central. No servidor, uma aplicação desenvolvida em Node.js opera como um serviço de backend, recebendo e processando os dados, que são então persistidos em um banco de dados para análise histórica e tomada de decisão. A lógica de controle é centralizada neste servidor, que analisa os dados recebidos para determinar se o solo permaneceu seco por um período determinado. Ao detectar essa condição, o servidor envia uma resposta específica ao ESP32, que por sua vez aciona uma válvula solenoide por um tempo específico para iniciar a irrigação da horta. Esse modelo de arquitetura cliente-servidor em sistemas IoT além de automatizar o processo de irrigação, permite o monitoramento remoto do estado da horta o que se assemelha a prática de experimentação remota desenvolvida no RExLab, apresentado por autores como Heck et al. (2016) em seus estudos sobre a experimentação remota no ensino de física.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A implementação do projeto “Água que ensina: captação da chuva através de cisterna e irrigação sustentável com microcontrolador” resultou na criação de uma solução prática e educativa para o uso consciente da água na escola. O espaço destinado à instalação da cisterna foi restaurado, limpo e revitalizado, tornando-se agora um ambiente funcional, seguro e utilizável para atividades pedagógicas e de cuidado com o meio ambiente.

Promovendo a interdisciplinaridade a professora de Artes juntamente com os alunos realizaram a pintura da parede, tornando um espaço colorido e agradável.

Por fim, ainda não concluímos todas as etapas do projeto, faltando alguns detalhes de finalização, no entanto foram alcançados os seguintes resultados:

- Captação eficiente da água da chuva por meio da construção da cisterna, promovendo a sustentabilidade no uso dos recursos hídricos.
- Desenvolvimento de um protótipo que realiza coletas de um sensor de umidade do solo através da placa controladora ESP32.
- Redução do desperdício de água, com reaproveitamento da água da chuva.

- Requalificação do espaço escolar, anteriormente degradado, que agora se tornou um ambiente educativo e sustentável.
- Integração de saberes interdisciplinares, com envolvimento dos componentes curriculares de Ciências, Artes, Tecnologia, entre outros.
- Engajamento ativo dos estudantes, que participaram desde o planejamento até a execução, desenvolvendo protagonismo, responsabilidade e trabalho em equipe.
- Aumento da consciência ambiental e debate sobre justiça climática, sustentabilidade e os desafios do futuro.
- Aproximação da escola com a comunidade, ao compartilhar o projeto em feiras, exposições e eventos escolares.

O espaço reestruturado tornou-se também um exemplo prático de ação sustentável, servindo como instrumento de ensino-aprendizagem contínuo para novas turmas e projetos futuros.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas e da crescente necessidade de promover a gestão sustentável dos recursos naturais, torna-se essencial repensar o papel da escola como espaço de formação para a consciência crítica, ação cidadã e inovação socioambiental.

A construção de uma cisterna sustentável automatizada com microcontrolador representa não apenas uma solução técnica para o uso racional da água, mas também uma ferramenta pedagógica interdisciplinar que integra teoria e prática de forma significativa.

Ao mobilizar conceitos de educação ambiental crítica, justiça climática, tecnologia educacional e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), o projeto estimula o protagonismo dos estudantes e contribui para a formação de uma cultura de cuidado com o meio ambiente — especialmente em contextos locais como o município de Araranguá, que já vivencia os efeitos das alterações climáticas.

Conforme o Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), a escola é um dos setores fundamentais para a execução de ações voltadas à preservação da água e à adaptação às mudanças climáticas. Espera-se, portanto, que projetos como este se multipliquem, contribuindo com práticas sustentáveis tanto no ambiente escolar quanto na comunidade (BRASIL, 2008).

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a UFSC e pelo RExLab pelo apoio ao projeto, em especial ao Programa de Extensão da Educação Superior na Pós-Graduação (PROEXT-PG) e a CAPES que através da universidade forneceram materiais para que o projeto possa ser desenvolvido. Agradecemos também aos gestores da Escola de Ensino Básico Isabel Flores Hubbe que forneceram o espaço e materiais para a construção da horta e da cisterna.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC**. Brasília: MMA, 2008. Disponível em: <https://www.gov.br/mma>. Acesso em: 17 maio 2025.

DEFESA CIVIL DE SANTA CATARINA. **Relatório de eventos climáticos extremos: análise regional de impactos em municípios catarinenses – 2021**. Florianópolis: DCSC, 2021

HECK, C. et al. **Experiência de integração da experimentação remota no ensino de Física do Ensino Médio: percepção dos alunos**. *RENOTE*, Porto Alegre, v. 14, n. 2, 2016. DOI: 10.22456/1679-1916.70662. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/renote/article/view/70662>. Acesso em: 20 set. 2025.

JACOBI, P. R. **Educação Ambiental: o desafio da construção de um pensamento crítico, complexo e reflexivo**. *Educação & Pesquisa*, v.31, n. 2, 2005, pp. 233-250.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Agenda 2030: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org>.

SACHS, I. **Estratégias de Transição para o século XXI – Desenvolvimento e Meio Ambiente**. São Paulo: Studio Nobel – Fundação para o desenvolvimento administrativo, 1993.

IMPLEMENTAÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UMA AÇÃO EDUCATIVA DESENVOLVIDA EM UM ACAMPAMENTO ESCOTEIRO

Suzete da Luz Teza Batista¹, Kátia Cilene Rodrigues Madruga², Mônica Knöpker³

¹ Universidade Federal de Santa Catarina/Departamento de Energia e Sustentabilidade/suzete.teza@posgrad.ufsc.br

² Universidade Federal de Santa Catarina/Departamento de Energia e Sustentabilidade/katia.madruga@ufsc.br

³ Instituto Federal de Santa Catarina/Departamento de Ensino, Pesquisa e Extensão/monica.knopker@ifsc.edu.br

Resumo: A eficiência energética (EE) é fundamental nas discussões sobre sustentabilidade global, diante do esgotamento de recursos naturais e das mudanças climáticas. O Brasil tem adotado políticas públicas alinhadas a acordos internacionais, como o acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), visando não apenas reduzir o consumo energético, mas também fomentar uma cultura de sustentabilidade nos diferentes níveis da sociedade. Nesse contexto, a educação, especialmente a não formal, tem se mostrado uma ferramenta poderosa para alcançar públicos diversos e promover a adoção de práticas sustentáveis de forma eficaz. O movimento escoteiro destaca-se como um espaço propício para a realização de ações educativas que enfoquem a sustentabilidade, devido à sua abordagem prática, lúdica e voltada para o desenvolvimento de valores éticos, sociais e ambientais. A partir desse pressuposto, objetiva-se avaliar o potencial de uma ação educativa, desenvolvida em um acampamento escoteiro, para contribuir na implementação de políticas públicas de eficiência energética. O público-alvo serão crianças com idade entre seis e meio e dez anos de um grupo escoteiro de Santa Catarina. As atividades previstas acontecerão durante um final de semana (sábado e domingo) e serão alinhadas com o projeto Escoteiros pela Energia Solar que compõe uma das insígnias de especialidade da comunidade mundial Earth Tribe (Tribo da Terra), uma parceria entre a Organização Mundial do Movimento Escoteiro, o World Wide Fund for Nature – WWF (Fundo Mundial para a Natureza) e o UN Environment Programme (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente). A Insígnia Escoteiros pela Energia Solar inspira-se na iniciativa “Scouts Go Solar”, desenvolvida pela Solafrica, que é uma organização suíça independente, e adotada pela Organização Mundial do Movimento Escoteiro como um componente da Tribo da Terra. A partir dessa pesquisa, espera-se auxiliar na efetivação de políticas públicas voltadas à EE.

Palavras-chave: Eficiência energética. Educação ambiental. Movimento escoteiro.

1 INTRODUÇÃO

As políticas públicas de eficiência energética no Brasil desempenham um papel central na promoção da sustentabilidade, na redução de emissões de gases de efeito estufa e no fortalecimento da segurança energética. Elas são desenvolvidas em consonância com os compromissos internacionais assumidos pelo país. Iniciativas globais, como o Acordo de Paris e as Metas de Desenvolvimento Sustentável (ODS), são importantes esforços de cooperação nacional — entre governo e respectivas sociedades — e internacional — entre governos — para a mitigação das mudanças climáticas e a otimização do uso de recursos energéticos (Brasil, 2020).

O Brasil conta com uma série de políticas públicas para promover o uso racional da energia. Dentre elas, há o Plano Nacional de Energia (PNE) 2030. Elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em parceria com o Ministério de Minas e Energia (MME), ele estabelece metas ambiciosas para a redução do consumo de energia no país, com base na adoção de tecnologias mais eficientes e na promoção de mudanças comportamentais entre os consumidores. O PNE sugere medidas como a modernização de

equipamentos industriais, a adoção de programas de etiquetagem de eficiência energética para eletrodomésticos e automóveis, e a promoção de campanhas de conscientização para o uso racional de energia nas residências (Brasil, 2007).

Apesar dos avanços, as políticas públicas de eficiência energética no Brasil enfrentam desafios como a falta de articulação governamental, poucos investimentos em inovação e baixa conscientização da população. Nesse cenário, a educação, conforme aponta o Plano Nacional de Eficiência Energética 2023 (PNEf), destaca-se como uma estratégia potente para promover práticas sustentáveis e ampliar o alcance das ações de conscientização. Nesse mesmo sentido, o documento *Educação para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: objetivos de aprendizagem* afirma que “[...] todas as instituições de educação — desde a educação pré-escolar até a educação superior e a educação não formal e informal — podem e devem considerar como sua responsabilidade trabalhar intensamente com questões de desenvolvimento sustentável e promover o desenvolvimento de competências de sustentabilidade” (UNESCO, 2017).

O movimento escoteiro pode ser considerado um espaço de educação não formal. Dentre os espaços desse tipo, ele seria potente para tratar sobre EE, pois, de acordo com o *Projeto Educativo dos Escoteiros do Brasil*, “[...] os jovens são atores indispensáveis de desenvolvimento social, com um enorme potencial para atuar como agentes positivos de mudança em relação às principais questões que afetam o planeta” (UEB, 2021).

Sendo assim, o objetivo da pesquisa, que se encontra em desenvolvimento, é avaliar o potencial de uma ação educativa, desenvolvida em um acampamento escoteiro com o Ramo Lobinho para contribuir na implementação de políticas públicas de eficiência energética. Neste trabalho, será apresentado um recorte dessa pesquisa.

2 METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem exploratória e qualitativa. Ele será implementado por meio de uma pesquisa-ação, visto que a pesquisadora é chefe escoteira do Ramo Lobinho, público-alvo da pesquisa e, portanto, estará à frente das atividades que serão realizadas. Para nortear o estudo foram listados quatro objetivos específicos que são os seguintes: i) conhecer uma parcela dos estudos sobre as temáticas da pesquisa a partir de uma revisão bibliográfica e documental, ii) implementar uma ação educativa proposta em um acampamento escoteiro com o Ramo Lobinho e iii) analisar a ação educativa no sentido de identificar suas potencialidades e limitações para contribuir na implementação de políticas públicas de EE.

Com relação ao primeiro objetivo específico, a revisão bibliográfica e documental foi realizada a partir de bases de dados e materiais elaborados por órgãos governamentais, como o Ministério do Meio Ambiente, o Ministério de Minas e Energia e a Empresa de Pesquisa em Energia. A revisão para o tema Educação não formal, ainda não efetivada, será norteada pelos documentos do Ministério da Educação e com relação ao tema Movimento Escoteiro pelos documentos da União dos Escoteiros do Brasil.

No que tange ao segundo objetivo específico, no Quadro 1 é apresentado o planejamento da ação educativa que será realizada no acampamento escoteiro. Cabe destacar que a temática Energia será utilizada como fio condutor para todo o acampamento que acontecerá durante um final de semana, conforme exposto a seguir:

Quadro 1 - Planejamento da ação educativa

Atividade(s) e duração	Objetivo(s)
Levantamento de conhecimentos prévios por meio de questionamentos sobre os temas abordados no acampamento (30 min).	Expressar conhecimentos prévios sobre a temática do acampamento.
Abertura oficial e explicação da proposta do acampamento (20 min).	Compreender a proposta do acampamento e sentir-se motivado a participar ativamente.
Vivência: “Perseguindo o Sol” – CDs que refletem luz (30 min).	Compreender o papel do Sol como fonte de luz.
Construção de forno solar e preparo de fondue (20 min).	Vivenciar a utilização da energia solar de forma prática.
Jogo: “Não se queime ao Sol!” (Jogo de pega-pega no qual a proteção solar é representada por uma bola) (20 min).	Refletir sobre os cuidados com a exposição solar.
Dinâmica: “A Terra e sua Luz” (Utilização de uma lanterna simbolizando o sol e um globo terrestre) (45 min).	Compreender como o Sol ilumina e aquece a Terra e reconhecê-lo como fonte de energia essencial para a vida.
Atividade didática: “O que é energia solar?” (Utilização de maquete com energia solar e eólica como exemplo) (1h).	Compreender os conceitos básicos de energia solar de forma lúdica.
Jogo: “Estações das Energias” (Realização de quatro percursos utilizando tirolesa, cama de gato - tela de cordas suspensa, garrafas pet suspensas por barbantes e trilha sem obstáculos, representando quatro formas de energia) (1h).	Comparar fontes renováveis e não renováveis de energia.
Jogo: “Energia em Jogo” (Jogo de tabuleiro gigante com casas representando fontes de energia) (45 min).	Compreender impactos e vantagens das fontes de energia.
Jogo: “Meu consumo de energia” (Utilização de dados gigantes e bambolês para representar as casas do jogo de tabuleiro) (1h).	Refletir sobre hábitos de consumo de energia no cotidiano.
Painel Final: “Lobinhos pela Energia Solar” (Montagem de quebra-cabeça) (1h).	Expressar aprendizagens construídas no decorrer do acampamento.
Reflexão: “Raio de Sol” (Cada um recebe um raio de sol fictício e compartilha uma ação sustentável que pretende aplicar no seu dia a dia). (20 min).	Expressar aprendizagens construídas no decorrer do acampamento.

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

No que se refere ao terceiro objetivo específico, ele será realizado a partir da identificação de indícios de aprendizagem das crianças na ação educativa sobre o tema EE.

3 RESULTADOS PRELIMINARES

Até o momento, os resultados concentraram-se em parte do primeiro objetivo específico, apresentando um panorama das produções dos últimos cinco anos sobre os temas da pesquisa. A seleção dos artigos baseou-se em critérios temáticos definidos previamente, considerando sua relevância para a educação ambiental, a EE, a educação não formal e o movimento escoteiro, bem como sua contribuição para compreender relações entre práticas educativas e políticas públicas de EE. A partir disso, foram estabelecidos dois eixos exposto no Quadro 2:

Quadro 2 – Artigos selecionados

Critérios temáticos	Título	Autores, ano
INICIATIVAS EDUCACIONAIS EM CONTEXTOS DIVERSOS	Educação não formal: a praia como um espaço para Educação Ambiental	Fanfa, Guerra e Teixeira (2019)
	Extensão universitária na pandemia: tecnologias digitais para o ensino de eficiência energética e proteção climática	Souza <i>et al.</i> (2023)
	A educação pode economizar dinheiro, energia e o clima? — Avaliando os impactos potenciais da educação sobre as mudanças climáticas na alfabetização energética e no consumo de energia à luz da Diretiva da UE sobre eficiência energética e da Lei da Eficiência Energética da Áustria	Keller <i>et al.</i> (2022)
INICIATIVAS EDUCACIONAIS NO MOVIMENTO ESCOTEIRO	O Movimento Escoteiro e a Educação Ambiental: análise da presença da Educação Ambiental não-formal em uma tropa escoteira em Paranaguá (PR)	Raposo, Krelling, Cavallet (2019)
	Método educativo escoteiro e transdisciplinaridade: contribuições para educação ambiental à luz das atividades da Tribo da Terra - insígnia reduzir, reciclar e reutilizar tampinhas plásticas	Sobreira e Rosseto (2023)

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Dos artigos selecionados, os resultados destacam o potencial de espaços naturais como ambientes de aprendizagem e mostram que ações educativas sobre eficiência energética são viáveis mesmo fora do contexto escolar. Já os artigos sobre o movimento escoteiro fornecem subsídios à reflexão sobre seu potencial como ambiente de educação não formal para práticas voltadas à sustentabilidade. Suas características pedagógicas — como experiência prática, trabalho coletivo e contato com o meio ambiente — indicam que esse contexto favorece ações educativas sobre energia solar, consciência ambiental e participação cidadã, contribuindo para políticas públicas e reforçando a hipótese do trabalho.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa que está sendo desenvolvida busca estruturar uma investigação sobre a implementação de políticas públicas de EE por meio da avaliação de uma ação educativa em um acampamento escoteiro. Até o momento, realizou-se uma parte da revisão bibliográfica e documental. Esses encaminhamentos oferecem base para a continuidade do estudo.

Espera-se que a ação educativa no acampamento escoteiro com o Ramo Lobinho evidencie o potencial de práticas não formais na promoção do conhecimento e de atitudes sobre eficiência energética. Ademais, almeja-se estimular comportamentos sustentáveis e mostrar como experiências lúdicas e coletivas no contexto escoteiro podem apoiar políticas públicas de uso consciente de energia.

As próximas etapas concentrar-se-ão no término da revisão supracitada, na implementação e na análise da ação educativa.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050** (PNE 2050). Brasília: MME/EPE, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-nacional-de-energia/plano-nacional-de-energia-2050/relatorio-final/relatorio-final>. Acesso em: 25 jun. 2024.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030** (PNE-2030). Rio de Janeiro: EPE, 2007. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030>. Acesso em: 25 jun. 2024.

UEB. União dos Escoteiros do Brasil. **Projeto Educativo dos Escoteiros do Brasil - Educação Para A Vida**. Curitiba: UEB, 2021. Disponível em: https://www.escoteiros.org.br/wp-content/uploads/2021/09/ProjetoEducativo_2021.pdf. Acesso em: 18 mai. 2025.

UNESCO. Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura. **Educação para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: objetivos de aprendizagem**. Brasília: UNESCO, 2017. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000252197>. Acesso em: 21 mai. 2025.

ANÁLISE DO IMPACTO DA INTEGRAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Marcos Giehl¹, Leonardo Bremermann², Giuliano Arns Rampinelli³

^{1,2,3} Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade,
¹mrgiehl@gmail.com, ²leonardo.bremermann@ufsc.br, ³giuliano.rampinelli@ufsc.br

Resumo: A crescente inserção de veículos elétricos (VEs) representa um desafio significativo para o sistema elétrico de potência (SEP), tanto pelo aumento da demanda quanto pela necessidade de adaptação da rede. Este estudo, de caráter exploratório, foi desenvolvido por meio de revisão bibliográfica em bases científicas, priorizando artigos atualizados que abordam a relação entre mobilidade elétrica, confiabilidade do SEP e integração com fontes renováveis. A análise revelou que a integração descoordenada de VEs pode ter impactos negativos no SEP das perspectivas do Planejamento e da Operação. Estes impactos negativos podem ser observados através dos estudos de Adequação de Sistemas Elétricos, elevando indicadores como LOLP (Loss of Load Probability) e EDNS (Expected Demand Not Supplied), ou ainda, através dos estudos em Regime Permanente, que detectam sobrecargas em transformadores, instabilidade de tensão nas barras e aumento das perdas técnicas dos Sistemas. A combinação da demanda veicular com a variabilidade das fontes solar e eólica eleva a complexidade, já que a geração renovável nem sempre coincide com os períodos de maior utilização da rede, exigindo maior flexibilidade operacional e recursos de armazenamento. Para enfrentar esses desafios, a literatura aponta estratégias como o recarregamento inteligente, que ajusta a potência de recarga em função do estado da rede, e a agregação de frotas de VEs, permitindo sua utilização como recurso energético distribuído. Tais soluções podem não apenas mitigar sobrecargas e instabilidades, mas também integrar os VEs como ativos estratégicos de suporte à rede e na maior utilização de energias renováveis.

Palavras-chave: veículos elétricos; confiabilidade; sistemas elétricos de potência; energias renováveis.

1 INTRODUÇÃO

O avanço da mobilidade elétrica tem sido notável na última década. Estima-se que 30% da frota mundial de veículos de passageiros será composta por VEs até 2032 (Rietmann *et al.*, 2020). Esse crescimento gera impactos diretos sobre a rede elétrica, tanto pela elevação da demanda quanto pela necessidade de expansão da infraestrutura de recarga (Kapustin; Grushevenko, 2020). Ao mesmo tempo, a ampliação do uso de fontes solar e eólica contribui para a descarbonização, mas sua variabilidade natural traz incertezas à operação do SEP (Ueckerdt *et al.*, 2015).

Pesquisas apontam que carregamentos não coordenados podem provocar sobrecargas em transformadores, distorções harmônicas e instabilidades de tensão (Sun *et al.*, 2025). Em contrapartida, estratégias como: carregamento controlado, resposta à demanda e o uso de VEs como unidades móveis de armazenamento de energia (V2G), são consideradas alternativas promissoras para mitigar tais problemas (Sarathkumar *et al.*, 2025).

Nesse contexto, essa pesquisa busca contribuir na análise dos possíveis impactos causados pela mobilidade elétrica no Planejamento e Operação do Sistema Elétrico de Potência, considerando também os desafios relacionados à alta variabilidade

das fontes renováveis de energia, bem como a proposição de soluções visando reduzir esses impactos.

2 METODOLOGIA

A pesquisa adotou uma abordagem exploratória, fundamentada em uma revisão bibliográfica, entendida como um processo sistemático de busca, seleção e análise crítica de estudos já publicados sobre determinado tema. Segundo Finelli e Soares (2022), a partir da revisão bibliográfica é possível organizar o conhecimento existente, bem como identificar novas investigações. De acordo com Lösch *et al.*, (2023), pesquisas exploratórias permitem explorar questões complexas, fornecendo uma compreensão profunda e abrangente do fenômeno estudado. Nesse sentido, essa pesquisa priorizou a utilização de artigos científicos, por apresentarem maior atualidade, livros e teses.

As buscas foram realizadas em bases científicas reconhecidas, como IEEE *Xplore* e *ScienceDirect*, utilizando combinações de palavras-chave relacionadas a “*electric vehicles*”, “*reliability*” e “*power system*”. Foi realizado um processo de remoção de duplicatas e triagem a partir dos títulos e resumos, visando selecionar apenas os pertinentes ao tema central.

3 RESULTADOS

Esta seção apresenta, de forma resumida, a discussão acerca dos resultados da revisão bibliográfica realizada.

3.1 Impactos dos Veículos Elétricos na Operação dos Sistemas Elétricos de Potência

A inserção em massa de veículos elétricos modifica substancialmente o perfil de demanda elétrica. Entre os principais impactos observados estão o aumento expressivo da carga em horários específicos e a necessidade de reforço em componentes críticos como alimentadores e transformadores de distribuição (Yarramsetty *et al.*, 2025). A natureza estocástica da mobilidade elétrica gera ainda desafios de planejamento, pois a intensidade e o local da recarga variam de acordo com padrões de deslocamento que não seguem, necessariamente, a lógica tradicional do consumo residencial ou industrial.

Além disso, os VEs podem introduzir distúrbios de qualidade de energia, como harmônicos provenientes de conversores eletrônicos de potência, e afetar a estabilidade transitória em situações de falhas no sistema (Mlindelwa *et al.*, 2025). Em cenários mais

extremos, o carregamento descoordenado em massa pode provocar até mesmo colapsos parciais de tensão. Assim, os impactos vão além do simples aumento de carga, exigindo uma reavaliação abrangente da forma como o SEP é planejado, operado e protegido diante da nova realidade da mobilidade elétrica.

3.2 Confiabilidade do Sistema Elétrico de Potência

A confiabilidade do sistema elétrico de potência é um dos aspectos mais sensíveis à integração em larga escala de veículos elétricos. Estudos recentes indicam que, na ausência de coordenação adequada, o carregamento simultâneo de grandes frotas pode gerar sobrecarga em transformadores, instabilidade de tensão e elevação da probabilidade de falhas generalizadas (LOLP – Loss of Load Probability) (Sun *et al.*, 2025). Além disso, indicadores como a demanda esperada não suprida (EDNS – Expected Demand Not Supplied) tendem a crescer à medida que a penetração de VEs aumenta, demonstrando que o sistema se torna mais vulnerável a interrupções no fornecimento de energia (Thapa *et al.*, 2025).

Outro ponto relevante é que a variabilidade do comportamento dos consumidores, especialmente em cenários urbanos com alta densidade de recarga, adiciona incertezas significativas à operação do SEP. O problema é agravado pela coincidência entre horários de pico de consumo e períodos preferenciais de recarga dos veículos, o que pode comprometer a robustez operacional da rede (Pandit *et al.*, 2025). Dessa forma, a confiabilidade deixa de ser apenas uma função da capacidade instalada, passando a depender da previsibilidade do uso e da flexibilidade operacional dos novos recursos conectados ao sistema.

3.3 Integração com Energias Renováveis

A associação entre veículos elétricos e fontes renováveis de energia traz benefícios ambientais evidentes, mas também desafios relevantes do ponto de vista técnico-operacional. A variabilidade da geração solar e eólica, somada à imprevisibilidade da demanda veicular, tornam mais complexa a gestão da confiabilidade do sistema (Nelson *et al.*, 2025). Essa combinação aumenta a incerteza sobre o equilíbrio entre oferta e demanda em tempo real, podendo comprometer a segurança energética em cenários de elevada penetração de recursos distribuídos.

Outro problema identificado é a dificuldade em coincidir os períodos de geração renovável com os horários preferenciais de recarga dos VEs. Enquanto a geração solar, por exemplo, atinge seu pico durante o dia, a maior parte dos carregamentos ocorre no

período noturno, exigindo infraestrutura de armazenamento ou estratégias de deslocamento de carga (Sarathkumar *et al.*, 2025). Dessa forma, a integração com renováveis pode resultar em sobrecargas locais, baixa utilização da energia limpa disponível e maior dependência de geração convencional em horários críticos.

3.4 Estratégias de Mitigação

Diante desses desafios, a literatura aponta diferentes estratégias de mitigação. O recarregamento inteligente (*smart charging*) surge como uma das soluções mais eficazes, ao permitir o controle dinâmico da potência de recarga em função do estado da rede elétrica (Abate *et al.*, 2025). Essa abordagem possibilita a suavização de picos de demanda, o deslocamento de carga para horários de menor uso e a utilização otimizada da energia renovável disponível. Modelos de otimização baseados em técnicas como *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) e simulações de Monte Carlo têm sido aplicados para avaliar a viabilidade técnica e econômica dessas estratégias (Divya *et al.*, 2025). São Métodos aplicados aos estudos de Planejamento e Operação dos SEP.

Outra solução promissora é a agregação de veículos elétricos, em que o carregamento de grandes frotas é controlado de forma coordenada por meio de agregadores que atuam como intermediários entre consumidores e empresas do sistema elétrico no âmbito do Mercado de Energia Elétrico. Essa prática permite que os VEs funcionem como um recurso energético distribuído coletivo, oferecendo serviços de apoio ao SEP, como regulação de frequência, reserva de operação e suporte de tensão (Joshi e Thosar, 2025). Além de reduzir os riscos de sobrecarga e instabilidade, a agregação também amplia a participação dos usuários em mercados de energia, transformando os veículos elétricos de simples cargas passivas em ativos estratégicos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da revisão evidenciam que a transição para a mobilidade elétrica, embora essencial para a descarbonização, impõe desafios técnicos relevantes ao SEP. Os problemas identificados — sobrecargas, instabilidades, distúrbios de qualidade de energia e incompatibilidade entre oferta renovável e demanda veicular — demonstram a necessidade de uma gestão mais inteligente e coordenada. As estratégias discutidas, especialmente o *smart charging* e a agregação de frotas, destacam-se como alternativas viáveis para garantir maior confiabilidade e flexibilidade do sistema, ao mesmo tempo em que potencializam os benefícios ambientais das frotas elétricas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal de Santa Catarina e ao NTEEL pelo apoio institucional e pelas contribuições técnicas que viabilizaram essa pesquisa, e à **Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC)** pelo suporte financeiro, por meio da concessão de bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

FINELLI, L. A. C.; SOARES, W. D.. Revisão Bibliográfica: o uso da metodologia para a produção de textos. **Editora Científica**, 2022.

KAPUSTIN, N.; GRUSHEVENKO, D. Long-term electric vehicles outlook and their potential impact on electric grid. **Energy Policy**, 2020.

LÖSCH, S.; RAMBO, C. A.; FERREIRA, J. L. A pesquisa exploratória na abordagem qualitativa em educação. **Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação**, 2023.

MLINDELWA, S.; CHOWDHURY, S. D.; LENCWE, M. J. A review of reliability evaluation methods for electric vehicle charging infrastructure. **SAUPEC Conference – IEEE**, 2025.

NELSON, K.; MOHAMMADI, J.; CHEN, Y.; AVED, A.; FERRIS, D.; BLASH, E.; CRUZ, E. A.; MORRONE, P. Benefits and vulnerabilities of managing a growing fleet of networked electric vehicles. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2025.

PANDIT, D.; BENIDRIS, M.; THAPA, J.; LIVANI, H. Reliability assessment of power systems in the presence of large-scale EV integration. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2025.

RIETMANN, N.; HÜGLER, B.; LIEVEN, T. Forecasting the trajectory of electric vehicle sales and the consequences for worldwide CO₂ emissions. **Journal of Cleaner Production**, 2020.

SAFDARIAN, A.; FOTUHI-FIRUZABAD, M.; AMINIFAR, F. Compromising wind and solar energies from the power system adequacy viewpoint. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2012.

SARATHKUMAR, D.; SAJIN, J. B.; MANIVEL, M.; JAYAKUMAR, T.; RAGUL, S.; PONNUSAMY, S. Impact of electric vehicle integration on power grids: A comprehensive review. **IEEE ISCEES**, 2025.

SUN, L.; TEH, J.; LIU, W.; LAI, C.; CHEN, L. Impact of electric vehicles on power system reliability and related improvements: A review. **Electric Power Systems Research**, 2025.

THAPA, J.; OLOWOLAJU, J.; BENIDRIS, M.; LIVANI, H. Power system reliability assessment under electric vehicle and photovoltaic uncertainty. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2025.

UECKERDT, F.; BRECHA, R.; LUDERER, G. Analyzing major challenges of wind and solar variability in power systems. **Renewable Energy**, 2015.

YARRAMSETTY, C.; MOGER, T.; JENA, D.; RAO, V. A novel transformer-based approach for reliability evaluation of composite systems with renewables and plug-in hybrid electric vehicles. **IEEE Access**, 2025.

AVANÇOS EM SISTEMAS HÍBRIDOS COM SUPERCAPACITORES E BATERIAS PARA MICRORREDES RENOVÁVEIS: UMA REVISÃO INTEGRATIVA COM AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA E ECONÔMICA

Luis Fernando Espinosa Cocian¹, Analúcia Schiaffino Morales²

¹ UFSC/PPGES/luis.cocian@posgrad.ufsc.br

² UFSC/PPGES/analucia.morales@ufsc.br

Resumo: Esta revisão integrativa analisa os avanços recentes em sistemas híbridos de armazenamento de energia (HESS - Hybrid Energy Storage System) que combinam baterias de lítio-polímero e supercapacitores para aplicações em microrredes renováveis de baixa potência (< 600 W). O estudo foi adaptado do PRISMA, com seleção de 184 artigos publicados em 2025, dos quais 42 foram incluídos na análise qualitativa e 10 na quantitativa. Os resultados demonstram que as topologias de conversores totalmente ativos alcançam eficiências de até 94,3%, enquanto nanomateriais como grafeno-MXene atingem capacitâncias específicas de 720 F/g. Estratégias de controle baseadas em inteligência artificial reduzem o desgaste das baterias em até 40% e apresentam aplicações promissoras em veículos elétricos leves e microrredes isoladas. A avaliação de maturidade tecnológica (TRL - Technology Readiness Levels) indica que os componentes dos HESS se encontram em estágios entre 4 e 7, enquanto a análise econômica revela redução de até 25% no LCOE (Levelized Cost of Energy) e payback de 1,14 anos para sistemas off-grid. Conclui-se que os HESS são tecnologicamente viáveis e economicamente promissores, embora os desafios permaneçam na integração sistêmica, padronização e escalabilidade de nanomateriais.

Palavras-chave: armazenamento híbrido de energia, microrredes renováveis, supercapacitores, eletrônica de potência

1 INTRODUÇÃO

A transição energética tem impulsionado a descentralização da geração elétrica, com destaque para microrredes renováveis em áreas urbanas e rurais. Essas estruturas integram fontes como solar fotovoltaica e microgeração eólica, garantindo autonomia a residências, comunidades isoladas e aplicações críticas, como postos de saúde e telecomunicações (Wang et al., 2025). Em países em desenvolvimento, crescem projetos abaixo de 1 kW, pela capacidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e aumentar a resiliência em cenários de instabilidade da rede (Samal et al., 2025).

Entretanto, a intermitência das fontes renováveis de pequena escala compromete a confiabilidade do fornecimento, gerando oscilações de tensão e frequência que afetam a estabilidade do sistema. O armazenamento de energia torna-se essencial nesse contexto. Embora baterias de lítio-polímero (LiPo) ofereçam alta densidade energética, sua durabilidade é limitada sob ciclos intensos, resultando em desgaste acelerado e altos custos de reposição (Ramesh et al., 2025).

Os sistemas híbridos de armazenamento ou *Hybrid Energy Storage System* (HESS) surgem como alternativa promissora ao combinar baterias e supercapacitores. Estes últimos apresentam alta densidade de potência, longa vida útil (até um milhão de ciclos) e resposta ultrarrápida, absorvendo picos de carga em milissegundos (Arya et al.,

2025). Assim, os supercapacitores suavizam flutuações instantâneas e prolongam a vida útil das baterias (Maruf et al., 2025).

Avanços recentes favorecem a adoção dos HESS, incluindo conversores totalmente ativos de alta eficiência (Dayar & Keskin, 2025), nanomateriais aplicados a eletrodos (Arya et al., 2025; Arumugam et al., 2025) e estratégias de controle baseadas em inteligência artificial (Zhou et al., 2025). Persistem, contudo, desafios como escalabilidade industrial, padronização de arquiteturas e integração entre métricas tecnológicas (TRL) e econômicas (LCOE, payback).

Diante disso, este trabalho apresenta uma revisão integrativa sobre HESS aplicados a microrredes renováveis de baixa potência (< 600 W), abordando aspectos técnicos, materiais emergentes, estratégias de controle e viabilidade econômica. Diferentemente de outras revisões estudadas (ex. Dayar & Keskin, 2025, e outras não citadas), integra-se aqui a avaliação de maturidade tecnológica com métricas de custo, oferecendo uma visão abrangente para pesquisa e prática em sistemas de pequena escala.

2 METODOLOGIA

Este estudo apresenta o resultado de uma revisão integrativa, baseada em recomendações do PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), visando assegurar transparência e reprodutibilidade. O processo envolveu três etapas: (i) definição da estratégia de busca; (ii) triagem e seleção dos artigos; e (iii) categorização e análise crítica dos resultados.

Foram consideradas as bases de dados: IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, Scopus e Web of Science, utilizando combinações de palavras-chave como “hybrid energy storage system”, “HESS”, “microgrid”, “supercapacitor” e “lithium battery”. Foram consideradas publicações do ano de 2025, publicadas até agosto de 2025. O recorte temporal do ano de 2025, deve-se ao interesse em pesquisas mais recentes sobre o tema.

Os critérios de inclusão contemplaram artigos revisados por pares, com estudos experimentais, de modelagem ou simulação em HESS aplicados a microrredes de até 1 kW, e que apresentassem métricas técnicas (eficiência, degradação, vida útil) ou econômicas (LCOE, payback, custo por ciclo). Excluíram-se revisões sem análise quantitativa, trabalhos voltados a micro redes de média ou grande escala e publicações sem acesso integral.

No total, foram identificados 184 artigos, dos quais 42 atenderam plenamente aos critérios e análise qualitativa, sendo 10 os selecionados para a pesquisa. Os estudos

foram organizados em quatro eixos: (1) aspectos técnicos – arquiteturas de conversores e estratégias de gerenciamento; (2) materiais emergentes – eletrodos, eletrólitos e nanomateriais; (3) estratégias de controle – métodos clássicos, preditivos e inteligência artificial; e (4) viabilidade econômica – LCOE, payback e comparação com soluções convencionais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os principais resultados da revisão integrativa sobre HESS em microrredes de baixa potência, organizados em quatro eixos: topologias de conversores, materiais avançados para supercapacitores, estratégias de controle e avaliação tecnológica e econômica. A análise destaca soluções promissoras e aponta desafios técnicos e econômicos para implementação em larga escala.

3.1 Topologias de Conversores

As arquiteturas de conversores determinam a eficiência global dos HESS. Entre os modelos analisados, as topologias totalmente ativas com conversores bidirecionais demonstraram melhor desempenho técnico e resposta dinâmica, alcançando eficiências médias de 94,3% (Dayar & Keskin, 2025). A Tabela 1 compara diferentes configurações.

Tabela 1 – Comparação de topologias de conversores

Topologia	Eficiência (%)	Custo (USD/Wh)	Tempo de Resposta (ms)
Totalmente ativa	94,3 ± 1,2	0,38	8
Semi ativa	88,7 ± 2,1	0,28	65
Passiva	82,1 ± 3,4	0,18	210

Fonte: Adaptado de Dayar e Keskin (2025).

Embora as topologias passivas apresentem menor custo inicial, o desempenho inferior em eficiência e tempo de resposta limita sua aplicação em cenários que exigem confiabilidade energética, como hospitais rurais e sistemas de telecomunicação off-grid.

3.2 Materiais Avançados para Supercapacitores

Os avanços em nanotecnologia aplicada aos eletrodos são um dos principais motores de inovação em HESS. Destacam-se os híbridos de grafeno-MXene, que alcançam capacitâncias específicas de até 720 F/g, com 95% de retenção após 25 mil ciclos — desempenho até 40% superior ao de eletrodos de carbono ativado (Arya et al., 2025). A utilização de eletrólitos líquidos iônicos também permite operar acima de 3,5 V, aumentando

a densidade energética e reduzindo o número de dispositivos por sistema (Arumugam et al., 2025). Persistem, porém, barreiras ligadas à produção em escala e à sustentabilidade ambiental. Estudos recentes exploram ainda supercapacitores fotossensíveis, capazes de converter e armazenar energia simultaneamente, embora restritos a estágios iniciais de maturidade (TRL 3–4).

3.3 Estratégias de Controle

O gerenciamento do fluxo de energia entre baterias e supercapacitores é essencial para prolongar a vida útil do sistema. Entre as 18 abordagens analisadas, destaca-se o Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC), com precisão de até 92% na estimativa de SOC. Estratégias de Aprendizado por Reforço também aumentaram em média 15% a vida útil das baterias, reduzindo o desgaste térmico e elétrico em 22–40% (Zhou et al., 2025). Ensaios em sistemas solares domésticos e veículos elétricos leves confirmam o potencial desses métodos, e a tendência é a adoção de controle inteligente embarcado, com diagnósticos autônomos e previsão de falhas (Gallage et al., 2025).

3.4 Avaliação Tecnológica e Econômica

A avaliação de maturidade tecnológica (TRL) revelou estágios diferenciados entre os componentes: Materiais de eletrodo: TRL 6–7; Eletrônica de potência: TRL 5–6; Controle inteligente: TRL 5 e; Integração completa em HESS: TRL 4.

Em termos econômicos, Xu et al. (2023) identificaram que microrredes de <1 kW em regiões isoladas, como postos de saúde rurais, apresentam redução de até 25% no LCOE com HESS em comparação a soluções apenas com baterias. Embora o CAPEX inicial seja mais elevado (USD 1.200 contra USD 800), o payback médio de 1,14 anos e o prolongamento da vida útil justificam a adoção. Esse resultado evidencia que os HESS não apenas melhoram a confiabilidade operacional, mas também contribuem para a viabilidade econômica de projetos de eletrificação rural e emergencial.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da revisão integrativa fortalecem que o uso de HESS, baseados em baterias LiPo e supercapacitores, constituem uma solução tecnicamente viável. Além disso, apresentam-se economicamente atrativas para microrredes renováveis de baixa potência. Os avanços recentes em conversores totalmente ativos, nanomateriais de alto desempenho e estratégias de controle inteligente demonstram ganhos claros em eficiência, durabilidade e redução de custos operacionais.

Desafios como a integração sistêmica entre os subsistemas de eletrônica de potência, a padronização internacional de protocolos de comunicação e monitoramento, a sustentabilidade ambiental da produção de nanomateriais em escala industrial e a necessidade de políticas públicas para incentivar tecnologias híbridas em projetos de eletrificação descentralizada ainda não possuem soluções plenamente estabelecidas.

No horizonte de médio prazo, espera-se que a convergência entre inteligência artificial, IoT e novos materiais possibilite a criação de HESS mais compactos, resilientes e adaptados às demandas de aplicações off-grid, urbanas e portáteis. Tais avanços podem desempenhar papel fundamental na transição energética global, garantindo acesso confiável e sustentável à energia em regiões ainda não plenamente atendidas pelas redes convencionais.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por possibilitar o desenvolvimento da pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

ARUMUGAM, C. et al. Design and Simulation of Efficient Supercapacitor Model Using Matlab/Simulink. **High Energy Chemistry**, v. 59, n. 2, p. 101–106, 2025.

ARYA, S. et al. Energizing tomorrow: The potential of light-driven supercapacitors in future applications. **Journal of Energy Chemistry**, v. 105, p. 193–223, 2025.

DAYAR, Y.; KESKIN, F. Solar Energy and Supercapacitor Integration: Efficient Energy Storage Solutions. In: **2025 7th International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (ICHORA)**. IEEE, 2025. p. 1–6.

GALLAGE, N. P. et al. Renewable energy-powered DC-converted refrigerator based on a supercapacitor-assisted technique. In: **2025 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**. IEEE, 2025. p. 874-879.

MARUF, H. et al. Hybrid supercapacitor–battery storage for electric vehicle applications: control and thermal management. **Journal of Energy Storage**, v. 74, p. 110–122, 2025.

PAGE, M. J. et al. **The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for 646 Reporting Systematic Reviews**. *Syst. Rev.*, v. 10, n. 89, p. 10.1186, 2021.

RAMESH, A. et al. Performance degradation and scaling challenges in nanostructured supercapacitors for hybrid storage. **Electrochimica Acta**, v. 475, p. 145–156, 2025.

SAMAL, S. et al. Multi-objective optimization of hybrid battery-supercapacitor energy storage systems. **Renewable Energy**, v. 226, p. 560–573, 2025.

WANG, T. et al. Stability and performance assessment of hybrid microgrids with supercapacitor-battery systems. **Applied Energy**, v. 348, p. 120–136, 2025.

XU, C. et al. Economic Analysis of Li-Ion Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System Considering Multitype Frequency Response Benefits in Power Systems. **Energies**, v. 16, n. 18, p. 6621, 2023.

ZHOU, J. et al. Research on Coordination Strategy and Operation Characteristics of Supercapacitor-Battery Hybrid Energy Storage System. In: 2025 **7th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium** (AEEES). IEEE, 2025. p. 1470-1475.

IMPACTO DA TECNOLOGIA BIFACIAL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA SOB CONDIÇÕES OPERACIONAIS REAIS

Letícia Toreti Scarabelot¹, Laís Costa Duarte², Giuliano Arns Rampinelli³

¹ Universidade Federal de Santa Catarina / leticiascarabelot@yahoo.com.br

² Universidade Federal de Santa Catarina / laiscduarte1@gmail.com

³ Universidade Federal de Santa Catarina / giuliano.rampinelli@ufsc.br

Resumo: A expansão da energia solar fotovoltaica desempenha papel estratégico na transição energética global, impulsionada por avanços tecnológicos que buscam maior eficiência e aproveitamento de recursos energéticos. Nesse contexto, a tecnologia de módulos fotovoltaicos bifaciais (bPV) surge como uma alternativa promissora para maximizar a geração de energia elétrica em áreas já edificadas, embora sua performance em telhados seja menos documentada que em usinas de solo. Este trabalho teve como objetivo comparar o desempenho de sistemas fotovoltaicos de silício monocristalino bifacial (bPV) e monofacial (mPV) em um telhado metálico no sul do Brasil, utilizando dados operacionais reais coletados ao longo de 36 meses. Os principais resultados apontam uma superioridade consistente do sistema bPV, que apresentou uma produtividade média mensal de 114,44 kWh/kWp, contra 107,05 kWh/kWp do sistema mPV, representando uma vantagem de 6,90%. O ganho bifacial médio mensal foi de 7,63%, demonstrando a eficácia da tecnologia em diferentes condições de irradiância solar. A adoção de módulos bifaciais em telhados é uma estratégia tecnicamente vantajosa, capaz de ampliar a produtividade de sistemas de geração distribuída e otimizar o uso do espaço urbano, desde que acompanhada por boas práticas de projeto que considerem as particularidades da tecnologia.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos, Módulo Fotovoltaico Bifacial, Ganho Bifacial, Geração Distribuída.

1 INTRODUÇÃO

A crescente busca pela maximização da geração de energia elétrica tem impulsionado avanços contínuos no desenvolvimento das tecnologias de módulos fotovoltaicos. Esse movimento está diretamente associado à necessidade de elevar a eficiência dos sistemas, reduzir custos de implantação e otimizar o aproveitamento da área disponível. Nesse cenário, a tecnologia de módulos bifaciais (bPV), que aproveita a radiação solar em ambas as faces, vem ganhando espaço por seu custo-benefício atrativo (Tan et al., 2024). A literatura científica evidencia os ganhos bifaciais principalmente em sistemas instalados em solo, onde o albedo é potencializado pela altura dos módulos. No entanto, a aplicação em telhados, fundamental para a expansão da geração distribuída em centros urbanos, ainda é um campo com menor volume de estudos de longo prazo. Assim, torna-se relevante mensurar o ganho energético em telhados para validar a viabilidade técnica da tecnologia em áreas já edificadas. Este artigo tem como objetivo apresentar uma análise de desempenho comparativa, baseada em 36 meses de operação de sistemas fotovoltaicos monofacial (mPV) e bifacial (bPV) instalados em um telhado metálico no sul do Brasil, fornecendo dados realistas de produtividade e ganho bifacial para subsidiar projetistas e tomadores de decisão.

2 METODOLOGIA

Para avaliar o desempenho das tecnologias, foram utilizados dados de dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede, instalados sobre uma mesma cobertura de telha metálica na cidade de Araranguá, Santa Catarina (latitude 28°56'05" sul, longitude 49°29'09" oeste). Um sistema é composto por 22 módulos de silício monocristalino bifacial (bPV) com potência nominal de 445 Wp, totalizando 9,79 kWp, e o outro por 18 módulos de silício monocristalino monofacial (mPV) com potência de 545 Wp, totalizando 9,81 kWp. Ambos utilizam inversores idênticos e foram montados a uma altura de 10 cm em relação ao telhado. O período de monitoramento compreendeu 36 meses, de abril de 2022 a março de 2025, sem que houvesse limpeza dos módulos. A aquisição de dados de geração de energia foi realizada pela plataforma integrada aos inversores.

A produtividade é um índice de mérito técnico que será utilizado para analisar diferentes sistemas FV. A produtividade de um sistema FV é a razão entre a energia elétrica convertida pelo sistema FV (kWh) e sua potência nominal (kWp). Este índice pode ser determinado em diferentes bases de tempo e pode ser calculado pela Eq. (1).

$$Y_F = \frac{1}{P_{STC}} \int_0^T P_{CA}(t) dt \quad (1)$$

na qual, P_{STC} é a potência nominal nas condições padrão de teste (STC) de 1000 W/m², (T é o período analisado e P_{CA} é a potência elétrica efetivamente convertida pelo sistema FV em operação (Davi *et al.*, 2016).

Para avaliar a superioridade da tecnologia bPV, foram utilizados dados coletados da operação de sistemas fotovoltaicos, aplicando-se o cálculo do ganho bifacial, Eq. (2) (Gu *et al.*, 2021).

$$\text{Ganho bifacial (\%)} = \left[\frac{E_{bPV} - E_{mPV}}{E_{mPV}} \right] \cdot 100 \quad (2)$$

na qual, E_{bPV} é a energia elétrica gerada pelo sistema bPV e E_{mPV} é a energia elétrica gerada pelo sistema mPV, em kWh.

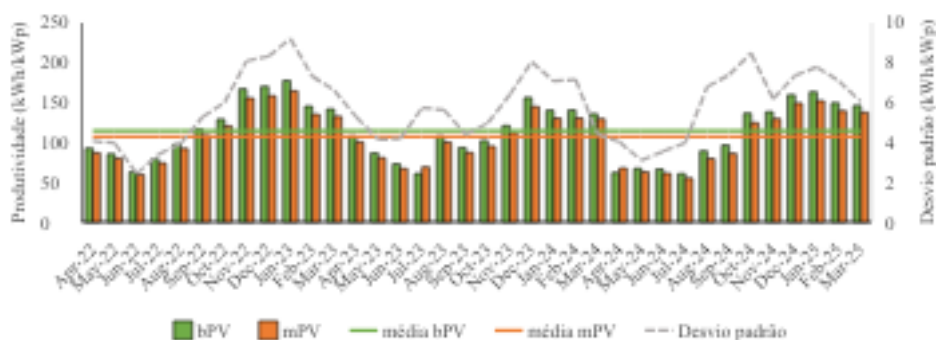
O coeficiente de variação – CV, mede a variabilidade relativa de um conjunto de dados e compara o desvio padrão de um conjunto de dados com sua média, usado para avaliar quanta variação existe em relação à média, Eq. (3) (Dias *et al.*, 2025).

$$CV = \frac{\text{desvio padrão}}{\text{média da amostra}} \quad (3)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo dos 36 meses de monitoramento, o sistema bifacial (bPV) apresentou um desempenho consistentemente superior ao sistema monofacial (mPV), especialmente nos períodos de maior recurso solar. A produtividade média mensal do sistema bPV foi de 114,44 kWh/kWp, enquanto o sistema mPV atingiu 107,05 kWh/kWp, o que representa uma superioridade média de 6,90% para a tecnologia bifacial. A Figura 1 ilustra a evolução da produtividade mensal de ambos os sistemas, evidenciando que a diferença de desempenho se acentua nos meses de verão, quando a maior irradiância solar aumenta a contribuição da face traseira dos módulos bPV.

Figura 01 – Produtividade (kWh/kWp) para os sistemas FV ao longo de 36 meses.



Fonte: A autora.

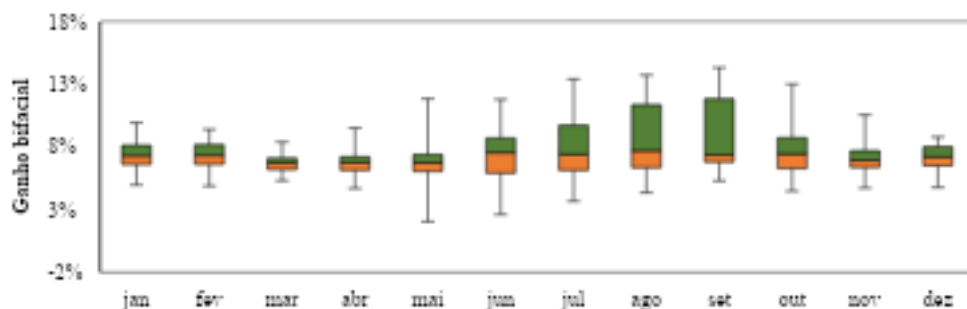
O ganho bifacial (BG) médio mensal, foi de 7,63%. Observou-se uma variabilidade significativa nos meses de julho, agosto e setembro de 2024, que apresentaram os maiores ganhos (10,24%, 12,10% e 12,18%, respectivamente). Esse comportamento atípico coincide com o período em que a região sul do Brasil foi afetada pela fumaça de queimadas na Amazônia (INPE, 2025), o que aumenta a radiação difusa e, consequentemente, favorece o ganho bifacial.

A análise estatística do ganho bifacial diário, apresentada na Figura 2, mostra a mediana variando entre 6,72% e 7,20%. Os meses de julho, agosto e setembro apresentam maior amplitude e média superiores à mediana, configurando meses com maior dispersão dos valores.

Em condições de baixa irradiação solar, o ganho bifacial apresentou maiores valores nesse período, aumentando a amplitude dos dados. Adicionalmente, 50% dos

valores de ganho bifacial ficaram entre 6,13 e 11,84%, enquanto, nos demais meses, os valores de ganho bifacial ficaram entre 5,90 e 9,72%.

Figura 02 – Distribuição dos valores medidos do ganho bifacial diário.



Fonte: A autora.

A Tabela 1 mostra o coeficiente de variação para cada mês, sendo que os maiores valores acontecem nos meses de julho, agosto e setembro, indicando alta variabilidade, que corrobora com o perfil atípico desses meses no ano de 2024, causado pelas queimadas.

Tabela 1 – Coeficiente de variação (CV) mensal do ganho bifacial.

Mês	CV	Mês	CV	Mês	CV
jan	4,57%	mai	2,32%	set	34,27%
fev	4,15%	jun	21,32%	out	17,54%
mar	18,70%	jul	31,49%	nov	8,95%
abr	8,00%	ago	35,59%	dez	6,00%

Fonte: A autora.

Os resultados confirmam que os sistemas bifaciais (bPV) exigem dimensionamento mais criterioso para evitar sobrecargas e cortes de potência, garantindo que seus ganhos energéticos sejam efetivos. O monitoramento em condições reais por 36 meses mostrou uma produtividade média 6,90% superior ao sistema monofacial (mPV), com melhor desempenho especialmente nos meses de maior recurso solar. Apesar da maior variabilidade em períodos afetados por queimadas, o bPV manteve vantagem significativa. Esses achados reforçam o potencial da tecnologia bifacial para aplicações em telhados e a importância de estratégias adequadas de projeto para assegurar eficiência, durabilidade e confiabilidade dos sistemas fotovoltaicos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo demonstrou, com base em 36 meses de dados operacionais em um telhado metálico no sul do Brasil, que a tecnologia fotovoltaica bifacial apresenta um desempenho energético superior em comparação à tecnologia monofacial. O ganho de produtividade médio de 6,90% e o ganho bifacial de 7,63% confirmam que a adoção de módulos bPV é tecnicamente vantajosa no ambiente construído, um cenário ainda pouco documentado na literatura. Os resultados indicam que a captura de irradiância pela face traseira contribui para o desempenho em diferentes regimes de céu, com uma ampliação relativa do ganho em condições de maior radiação difusa, como em dias nublados ou afetados por fumaça. As implicações de engenharia para projetos de geração distribuída são diretas: a escolha de módulos bifaciais deve ser acompanhada por um dimensionamento criterioso do inversor para evitar perdas por *clipping*, além de decisões de projeto que mitiguem o sombreamento da face traseira, como altura e espaçamento adequados. Embora a ausência de medições locais de irradiância e albedo seja uma limitação, os achados reforçam o potencial da tecnologia bifacial para otimizar a geração de energia em telhados, fortalecendo o papel da geração distribuída na transição energética.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo apoio financeiro. Ao Núcleo de Tecnologia em Energia Elétrica (NTEEL) da UFSC e ao Centro de Pesquisa em Energia e Sustentabilidade (CPEES) também são reconhecidos.

REFERÊNCIAS

DAVI, G. A.; CAAMANO-MARTIN, E.; RUTHER, R.; SOLANO, J. Energy performance evaluation of a net plus-energy residential building with grid-connected photovoltaic system in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 120, p. 19–29, 15 mai. 2016.

DIAS, D. L.; RAMPINELLI, G. A.; GARRIDO, G. N.; TEJERO, J. A.; CARDONA ORTÍN, M. S. DE; BREMERMAN, L. E. Performance assessment of bifacial and monofacial PV systems on different types of soils in a low-latitude site. **Renewable Energy**, v. 246, p. 122868, 15 jun. 2025.

GU, W.; LI, S.; LIU, X.; CHEN, Z.; ZHANG, X.; MA, T. Experimental investigation of the bifacial photovoltaic module under real conditions. **Renewable Energy**, v. 173, p. 1111–1122, ago. 2021.

INPE. Programa Queimadas do INPE. Disponível em:

<<https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/portal/>>. Acesso em: 1 ago. 2025.

TAN, H. L.; LIM, B. H.; TAN, M. H.; ZENG, X.; CHONG, K. K.; CHUA, K. H. Investigation of Bifacial Gain and Albedo of Bifacial Photovoltaic Modules that Operate in a Tropical Site. In: 8th International Conference on Green Energy and Applications, ICGEA, 2024.

ESTUDO DE CASO SOBRE FALHAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM AMBIENTES LITORÂNEOS: ANÁLISE DA POUSADA TRILHA DO MAR – AL

Maria de Lourdes Soares de Souza¹, Marcelo de Assis Corrêa², Eliane dos Santos Ribeiro³, João Pinto Cabral Neto⁴, Simone Machado Santos⁵

¹ UFPE/PPGECAM/mariasouza@ufpe.br

² ITM-Grupo de Pesquisa/IFAL/marcelo.assis@ifal.edu.br

³ ASCES/Direito/elianeribeiro.jus@hotmail.com

⁴ ITM-Grupo de Pesquisa/IFAL/joao.cabral@ifal.edu.br

⁵ UFPE/PPGECAM /simone.machadosantos@ufpe.br

Resumo: Nos últimos anos, a geração fotovoltaica consolidou-se como uma das principais fontes renováveis na matriz elétrica mundial, desempenhando papel estratégico na reconfiguração do setor energético internacional. No Brasil, a energia solar ocupa a segunda posição em capacidade instalada, impulsionada pela elevada incidência solar, especialmente no Nordeste. Entretanto, fatores ambientais e estruturais podem comprometer o desempenho e a vida útil dos sistemas. A particularidade de cada região onde a usina é situada, pode levar ao surgimento de fatores específicos, mais ou menos agressivos. Este trabalho apresenta um estudo de caso de uma usina fotovoltaica instalada na Pousada Trilha do Mar, no litoral de Marechal Deodoro – AL, com o objetivo de identificar e analisar falhas recorrentes em equipamentos, a fim de caracterizar os principais problemas encontrados em ambientes litorâneos, caracterizados por altas temperaturas, umidade e salinidade. O processo investigativo ocorreu através de observação técnica e entrevista com o corpo de engenharia responsável da usina. A partir disto, foram identificados quatro fatores principais que levaram a ocorrência de defeitos: alta concentração de salitre, baixa regulação da tensão de distribuição durante o período de veraneio, o acúmulo de sujeira nos módulos em função da poeira constante, além da exposição contínua a calor e umidade. Os resultados evidenciam impactos na eficiência energética, corrosão de componentes e queima de dispositivos, ressaltando a necessidade de estratégias de manutenção, monitoramento e adequação regulatória. O estudo contribui para a compreensão dos desafios da geração solar em regiões litorâneas do Brasil, oferecendo subsídios técnicos para gestores e usuários de sistemas fotovoltaicos.

Palavras-chave: energia solar; fotovoltaica; salitre; ambiente litorâneo; estudo de caso.

1 INTRODUÇÃO

Na contemporaneidade, a matriz energética mundial tem apresentado crescente participação da geração solar, que em 2024 passou de 1,6 TW para 2,2 TW, um acréscimo de mais de 600 GW em novas usinas conectadas à rede (IEA, 2025). No Brasil, embora as hidrelétricas ainda representem a principal fonte de geração elétrica, a energia solar fotovoltaica ocupa a segunda posição em capacidade instalada. Em 2024, esse setor registrou aumento de 28%, alcançando 48.468 MW (EPE, 2025), impulsionado pelos elevados índices de radiação solar, especialmente na região Nordeste (INPE, 2017).

Apesar desse potencial, os módulos fotovoltaicos estão sujeitos a intempéries que afetam sua durabilidade e desempenho, como umidade, variações de temperatura e alta salinidade, que aceleram processos de degradação eletroquímica e reduzem a eficiência (RANA et al., 2025). No litoral oriental brasileiro, classificado como tropical e subtropical do tipo semiúmido marítimo (NOVAES, 2023), essas condições se intensificam, associando temperaturas médias em torno de 25 °C a elevada umidade relativa

(SANTIAGO; GOMES, 2016). Além disso, fatores como irradiância, vento e precipitação contribuem para o envelhecimento dos módulos (ISLAM et al., 2024).

Nesse contexto, a presente pesquisa justifica-se pela necessidade de compreender como as condições climáticas litorâneas impactam o desempenho de sistemas fotovoltaicos. O objetivo é analisar e caracterizar as principais falhas em usinas instaladas no litoral de Alagoas tendo em vista o perfil deste ambiente: alto índice de radiação solar; alto grau de salinidade e o modelo de rede de distribuição de energia adotado. Este ambiente permite a coleta de dados de operação em situação crítica de desempenho destes sistemas.

O Grupo de pesquisa em Instrumentação – ITM vem desenvolvendo e instalando sistemas de telemetria para monitoração e gerenciamento de usinas fotovoltaicas, como a usina instalada na Pousada Trilha do Mar, situada no litoral de Marechal Deodoro/AL – região metropolitana de Maceió/AL. Esta região caracteriza-se por um número elevado usinas fotovoltaicas de pequeno porte, instaladas em pousadas, restaurantes e pequenos negócios, todos direcionados ao turismo, fator chave da economia desta região.

2 METODOLOGIA

Este trabalho consiste em um estudo de caso em uma usina fotovoltaica de 6 kWp, em operação desde 2018. A pesquisa é descritiva, de abordagem qualitativa, com análise interpretativa de fatos observados e relatados (GOMES; GOMES, 2019).

A coleta de dados ocorreu por meio de questionário técnico, registros de observação e dados de telemetria realizados pela equipe de pesquisadores do ITM, responsável pelo monitoramento da usina.

As informações foram sistematizadas em categorias de análise correspondentes aos fatores recorrentes identificados: salinidade, variação de tensão, acúmulo de sujeira e exposição contínua a calor e umidade. Cada categoria foi descrita em termos de causas, efeitos e histórico de danos, possibilitando caracterizar os impactos do ambiente litorâneo sobre a eficiência e a durabilidade dos sistemas fotovoltaicos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos dados coletados na usina fotovoltaica localizada na Pousada Trilha do Mar, evidenciou quatro fatores principais de falha associados ao ambiente litorâneo. Estes problemas foram categorizados quanto a condicionantes, influências e danos

registrados, conforme apresentado no Quadro 1. Entre eles, destacou-se a alta concentração de salitre (NaCl , MgSO_4 , CaCl_2), que ocasionou corrosão acelerada em conexões e microinversores, levando ao curto-circuito e queima de um microinversor conectado a quatro módulos.

Quadro 01 - Causas de deterioração dos módulos fotovoltaicos – Litoral

Item	Condicionantes	Influências	Danos Registrados
(i)	Alta concentração de salitre (NaCl , MgSO_4 , CaCl_2)	Corrosão de conexões, estruturas metálicas e microinversores	Queima de microinversor e corrosão em componentes
(ii)	Baixa regulação da tensão (final de linha elétrica)	Oscilações e sobretensões que afetam inversores e equipamentos	Queima de 2 aparelhos de ar-condicionado e 1 geladeira
(iii)	Acúmulo de poeira sobre os módulos	Redução da captação solar	Baixa na produção de energia
(iv)	Alta umidade e temperaturas elevadas	Presença de fungos e degradação de materiais	Perda de eficiência e substituição do disjuntor principal

Fonte: Autores (2025).

O acúmulo de salitre e poeira reduziu a eficiência dos módulos, tornando necessária a limpeza periódica. A baixa regulação da tensão, agravada pela posição no fim da linha elétrica, causou oscilações que danificaram equipamentos e inversores. O monitoramento da tensão trifásica também mostrou elevação diurna na fase A, devido à geração fotovoltaica, e quedas noturnas abaixo dos limites da ANEEL (198 V a 242 V), evidenciando a necessidade de melhorias na rede elétrica local.

Figura 01 – Oscilações de tensão no sistema elétrico (fase A)



Fonte: Grupo de Pesquisa em Instrumentação e Metrologia – ITM (2025)

A combinação de alta umidade e calor favoreceu fungos e a degradação elétrica, exigindo a troca do disjuntor principal. Constatou-se que a exposição litorânea, com salinidade, instabilidade elétrica, sujeira e clima extremo, compromete a eficiência e a durabilidade dos sistemas, reforçando a necessidade de manutenção, monitoramento e ajustes regulatórios.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de caso realizado na usina fotovoltaica da Pousada Trilha do Mar evidenciou que as condições ambientais do litoral, caracterizadas por elevada salinidade, alta umidade, temperaturas elevadas e com a característica específica de instabilidade na rede elétrica (acentuadas no período de veraneio, dado o aumento da demanda), impactam diretamente a durabilidade e o desempenho dos sistemas solares. Foram identificadas falhas recorrentes relacionadas à corrosão de componentes, oscilações de tensão, acúmulo de sujeira nos módulos e degradação de materiais elétricos.

Os resultados evidenciam a necessidade de manutenção preventiva, monitoramento contínuo e melhorias na rede elétrica para garantir eficiência e durabilidade das usinas costeiras, além de oferecer subsídios técnicos para equipes na adoção de práticas mais eficazes de operação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), por meio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), e ao Instituto Federal de Alagoas (IFAL), por meio do Grupo de Pesquisa em Instrumentação (ITM), pelo suporte acadêmico, e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST: módulo 8, qualidade da energia elétrica**. Brasília, DF: ANEEL, 2020. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020888_prodinst_modulo_8_v11.pdf. Acesso em: 23 set. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário estatístico de energia elétrica 2025: factsheet**. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/anuario-factsheet.pdf>. Acesso em: 23 set. 2025.

GOMES, A. S.; GOMES, C. R. A. Classificação dos tipos de pesquisa em Informática na Educação. In: _____. **Métodos e pesquisas em Educação**. Brasília, DF: Editora Kiron, 2019. Cap. 4. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/333603263>. Acesso em: 23 set. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Snapshot of global PV markets 2025**. Paris: IEA PVPS, 2025. Disponível em: <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2025/>. Acesso em: 23 set. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. rev. São José dos Campos: INPE, 2017. 94 p. Disponível em: <http://url.official.inpe.br/atlas>. Acesso em: 18 set. 2025.

ISLAM, M. I.; JADIN, M. S. B.; MANSUR, A. A.; ALHARBI, T. Electrical performance and degradation analysis of field-aged PV modules in tropical climates: a comparative experimental study. **Energy Conversion and Management: X**, v. 22, p. 100719, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100719>.

NOVAES, R. M. L. (org.). **Livro dos climas do Brasil**. Belo Horizonte: Instituto Prístino, 2023. 642 p.

RANA, Z. et al. Solar panel corrosion: a review. **International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 26, n. 13, p. 5960, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms26135960>.

SANTIAGO, D. B.; GOMES, H. B. Estudo de ilhas de calor no município de Maceió/AL usando dados orbitais do Landsat 5. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 3, p. 793-803, 2016.

DIFERENTES METODOLOGIAS PARA ESTUDO DO AMBIENTE ESCOLAR COMO FACILITADOR DA APRENDIZAGEM

Caroline Winke Ávila¹; Carla de Abreu D'Aquino²

¹ Universidade Federal de Santa Catarina/Programa de Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade/carollwinke@gmail.com

² Universidade Federal de Santa Catarina/Programa de Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade/carla.daquino@ufsc.br

Resumo: O estudo teve como objetivo investigar o papel do ambiente escolar na promoção dos Temas Contemporâneos Transversais (TCTs), com ênfase na sustentabilidade e na transversalidade do ensino. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica com base em artigos publicados entre 2025 e 2026, selecionados nas bases CAPES, Science Direct e Scielo, com critérios de inclusão que consideraram a qualidade metodológica e a relevância temática. A análise de nove artigos evidenciou que ambientes escolares bem planejados, com atenção à acústica, presença de áreas verdes e práticas pedagógicas inovadoras, favorecem o bem-estar e o engajamento de alunos e professores, contribuindo para uma aprendizagem mais significativa. Os estudos analisados utilizaram metodologias variadas, incluindo abordagens qualitativas, quantitativas e mistas, com uso frequente de entrevistas e questionários. Verificou-se que a qualidade do espaço físico influencia diretamente a formação de vínculos afetivos, a construção da identidade e a relação dos estudantes com o meio ambiente. A revisão também revelou lacunas na literatura, como a escassez de pesquisas sobre a percepção sonora nos ambientes escolares e a integração efetiva das áreas externas como recursos pedagógicos. Conclui-se que o ambiente escolar deve ser compreendido como elemento ativo no processo educativo, exigindo novas abordagens interdisciplinares que integrem espaço, práticas pedagógicas e formação docente, visando uma educação mais crítica, inclusiva e alinhada aos desafios contemporâneos.

Palavras-chave: ambiente escolar, transversalidade, sustentabilidade, temas contemporâneos transversais, educação.

1 INTRODUÇÃO

O ambiente denominado espaço físico escolar possui uma importância vital para os indivíduos que o frequentam, visto que é um espaço de estudo, reflexão, interação social, debates e lazer. Neste sentido, os aspectos relacionados ao ambiente escolar podem ser utilizados como indicadores para avaliar e entender de que maneira o ambiente escolar pode ajudar a materializar os Temas Contemporâneos Transversais (TCTs). Além disso, é necessário compreender se ele, de fato, contribui para uma aprendizagem mais significativa, pois a estrutura física da escola, assim como sua organização, manutenção e segurança revelam muito sobre aqueles que ali vivem (Ribeiro, et al, 2012).

Constata-se inúmeras barreiras para se trabalhar os temas transversais, sobretudo àqueles ligados ao meio ambiente, justamente porque está amparado por um modelo curricular com viés eficientista e mercadológico, que reforça a fragmentação e a hierarquização do conhecimento escolar que as Diretrizes Nacionais para o Ensino Médio - DCNEM (TOMMASIELLO, et al, 2015). Diante desses obstáculos, é necessário e relevante analisar o papel da escola como ambiente fomentador da transversalidade.

O presente estudo teve por objetivo apresentar uma revisão bibliográfica referente a investigação de metodologias que suportem o estudo do ambiente escolar como facilitador para a materialização dos TCTs.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada para a revisão bibliográfica incluiu algumas etapas para uma fundamentação teórica mais robusta e contributiva. Primeiramente, buscou-se a seleção dos artigos, utilizando-se das bases de dados Portal de Periódicos CAPES, Science Direct e Scielo, com as seguintes palavras: “teacher perception” AND “practices” AND “transversality” AND “education for sustainability” AND “environment”.

Os critérios de inclusão se basearam em artigos publicados entre 2025 e 2026, em inglês, em periódicos com revisão por pares, resultando assim em um total de 32 artigos. Destes, 09 artigos foram incluídos na revisão final de acordo com sua base metodológica. Foi realizada então a leitura integral levantando os principais pontos e organizando as ideias por categorias temáticas. Os demais artigos que não se encaixam nestes critérios foram excluídos para este estudo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 resume as principais metodologias apontadas nos artigos e os principais resultados. A análise dos artigos revelou uma crescente preocupação com a qualidade dos ambientes escolares, especialmente no que diz respeito à acústica (Kurukose, et al, 2025; Lan, et al, 2025;), ao contato com a natureza (Gajdek, et al, 2025; Wahelo, et al, 2025; Ignell, et al, 2025; Wallerich, et al, 2025) e às práticas pedagógicas inovadoras (Holst, et al, 2025; Akarsu, 2025;). Observa-se uma tendência de valorização de espaços que promovam o bem-estar, engajamento e desenvolvimento integral dos alunos e professores.

Tabela 1 - Resumo da metodologia e principais resultados dos artigos selecionados para a revisão bibliográfica.

Título do artigo	Ano	Metodologia utilizada	Principais resultados
Perception of indoor and outdoor school soundscapes: A large-scale Cross-Sectional survey with UK teachers	2025	Metodologia qualitativa e abordagem interpretativista: utiliza entrevistas semiestruturadas para captar representações sociais.	Existem inúmeras formas de interpretar as representações sociais.
Realist evaluation of the impact and transferability of a greening of school playgrounds program: The APPIE GREEN study protocol	2025	Estudo de caso múltiplo em Bordeaux, com 70 participantes (crianças e funcionários), usando entrevistas e observações sistemáticas;	O estudo Appie Green concluiu que pode ajudar na prática do “brincar natural” através de subsídios para replicar intervenções.
Beyond the walls: Investigating outdoor learning experiences of social studies teacher candidates in Türkiye	2025	Metodologia qualitativa: Abordagem fenomenológica com foco nas experiências pessoais e conexões com a natureza de 25 futuros docentes.	A educação ao ar livre é eficaz no desenvolvimento do conhecimento, desenvolvimento social e emocional, engajamento dos alunos, consciência

			ambiental e habilidades interpessoais.
Why don't children study outside? Limitation of Polish schools to use green spaces in the educational process before and during COVID 19	2025	Analisou o acesso a espaços verdes em escolas públicas da Polônia usando Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e questionários online;	Os espaços verdes em terrenos escolares e proximidades, na Polônia, são geralmente acessíveis, embora o uso e as barreiras variem de acordo com a localização.
Geography teachers' implementation of problem-based learning for deforestation and climate change education in Metekel Zone Secondary Schools, Northwest, Ethiopia	2025	Metodologia mista (QUAN+): combinou dados quantitativos e qualitativos para investigar crenças e práticas de professores de Geografia sobre a Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL).	Ao fortalecer a formação docente e alinhar políticas educacionais com práticas inovadoras, é possível capacitar os alunos a se tornarem agentes ativos na redução do desmatamento e das mudanças climáticas..
Whole-school sustainability at the core of quality education: Wished for by principals but requiring collective and structural action	2025	Triangulação de dados com 80 entrevistas semiestruturadas, considerando critérios como tipo de escola, localização e perfil socioeconômico;	Ao trabalhar a sustentabilidade, um olhar mais coletivo e estrutural é fundamental para torná-la ainda mais significativa.
Educational building renovation for sustainability: Exploring key factors and pathways	2025	Análise Comparativa Qualitativa de Conjunto Difuso (fsQCA), para investigar lacunas em 30 projetos de renovação de escolas chinesas;	Projetos de renovação de edifícios educacionais depende de uma abordagem multifatorial, que vai além da EE e inclui mecanismos operacionais eficazes e a disposição dos usuários.
"It is not a complicated question but it is very complex" – Insights on school ground greening from practitioners	2025	Metodologia qualitativa com especialistas: entrevistas semiestruturadas com 26 profissionais experientes da área verde, baseando-se na Teoria Ecológica de Sistemas(PAA) para guiar a análise;	A gestão dos espaços verdes envolve múltiplos atores com interesses diversos e isso é complexo.
Students' and teachers' social representations of the student teacher relationships at disadvantaged secondary schools in Chile	2025	Metodologia qualitativa e abordagem interpretativista: utiliza entrevistas semiestruturadas para captar representações sociais.	Existem inúmeras formas de interpretar as representações sociais.

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Observou-se que os métodos utilizados variam entre abordagens quantitativas, qualitativas e mistas, além do uso de questionários, o que enriquece a compreensão do fenômeno e evidencia a complexidade das interações entre espaço, som, natureza e aprendizagem. Em conjunto, essas metodologias podem contribuir para o diagnóstico direcionado ao ensino dos TCT nas escolas e a verificação do ambiente escolar como facilitador da aprendizagem. Quando a escola não dispõe de um espaço bem planejado, com atenção à estética, presença de áreas verdes e estímulos sensoriais agradáveis, o aluno pode não se sentir motivado a construir vínculos harmoniosos com o meio, com os colegas e com sua própria identidade (Ribeiro, et al, 2012).

A revisão permitiu identificar lacunas na literatura, como a ausência de estudos sobre a percepção sonora em diferentes ambientes escolares, falta de integração sistemática da educação ao ar livre na formação docente e a não utilização efetiva de áreas verdes como recurso pedagógico.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica evidenciou que o ambiente escolar exerce papel fundamental na promoção dos temas contemporâneos transversais. O ambiente influencia nossos comportamentos cotidianos, molda a percepção visual, ativa símbolos e cria marcos de orientação. Os artigos analisados destacam a importância de espaços educativos que favoreçam o bem-estar, o engajamento e o desenvolvimento integral de alunos e professores, por meio de práticas como educação ao ar livre, uso de áreas verdes e atenção à qualidade acústica. A diversidade metodológica dos estudos, incluindo abordagens qualitativas, quantitativas e mistas, enriqueceu a compreensão das interações entre espaço físico, práticas pedagógicas e formação docente. Na maior parte dos estudos as entrevistas estiveram presentes.

Apesar dos avanços, foram identificadas lacunas relevantes, como a escassez de pesquisas sobre percepção sonora em diferentes contextos escolares e os desafios para integrar sistematicamente práticas sustentáveis na rotina educacional. Assim, reforça-se a necessidade de novas investigações interdisciplinares que considerem o ambiente escolar como elemento ativo na construção de uma educação mais significativa, inclusiva e alinhada aos desafios contemporâneos.

AGRADECIMENTOS

Para a realização deste estudo, agradeço à Capes, à Universidade Federal de Santa Catarina, ao Programa de Pós Graduação em Energia e Sustentabilidade; e ao Laboratório de Energias Renováveis e Aceitação Social.

REFERÊNCIAS

AKARSU A. H. Beyond the walls: Investigating outdoor learning experiences of social studies teacher candidates in Türkiye. **Teaching and Teacher Education**. v. 154. 2025. p. 104876. ISSN 0742-051X. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2024.104876>.

GAJDEK, A. et al. Why don't children study outside? Limitation of Polish schools to use green spaces in the educational process before and during COVID-19. **Cities**. v.162. 2025. p. 105993. ISSN 0264-2751. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.105993>.

HOLST, J. Whole-school sustainability at the core of quality education: Wished for by principals but requiring collective and structural action. **Journal of Cleaner Production**. v. 519. 2025. p. 145897. ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145897>.

IGNELL, S. et al. “It is not a complicated question but it is very complex” – Insights on school ground greening from practitioners. **Urban Forestry & Urban Greening**. v. 110. 2025. p. 128867. ISSN 1618-8667. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.128867>.

KURUKOSE, H. C.; ALETTA, F.; KANG, J. Perception of indoor and outdoor school soundscapes: A large-scale Cross-Sectional survey with UK teachers. **Applied Acoustics**. v. 227. 2025. p.110219. ISSN 0003-682X. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.110219>.

LAN, O.; SHIZHU, O. Educational building renovation for sustainability: Exploring key factors and pathways. **Alexandria Engineering Journal**. v. 120. 2025. p. 614-626. ISSN 1110-0168. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.02.015>.

MORALES-VERDEJO, J. Students’ and teachers’ social representations of the student-teacher relationships at disadvantaged secondary schools in Chile. **International Journal of Educational Research Open**. v. 8. 2025. p.100432. ISSN 2666-3740. <https://doi.org/10.1016/j.ijedro.2024.100432>.

RIBEIRO, A. C. S. et al. Qualidade de vida no ambiente escolar como componente da formação do cidadão: desejos e carências no espaço físico. **Revista Monografias Ambientais**. v. 8(8), p. 1850–1857. 2012 <https://doi.org/10.5902/223613086192>

TOMMASIELLO, M.G. C. et al. A EDUCAÇÃO AMBIENTAL COMO TEMA TRANSVERSAL NO ENSINO MÉDIO NA PERSPECTIVA DE PROFESSORES. **Rev. Comunic [online]**. 2015, v.22, n.esp, p 35-64. ISSN 2238-121X. <https://doi.org/10.15600/2238-121X/comunicacoes.v22n2ep35-64>.

WAHELO T. T.; MENGISTU, A. D; MERAWI, M. T. Geography teachers’ implementation of problem-based learning for deforestation and climate change education in Metekel Zone Secondary Schools, Northwest, Ethiopia. **International Journal of Educational Development**. v. 117. 2025. p. 103314. ISSN 0738-0593, <https://doi.org/10.1016/j.ijedudev.2025.103314>.

WALLERICH, L. et al. Realist evaluation of the impact and transferability of a greening of school playgrounds program: The APPIE GREEN study protocol. **Wellbeing, Space and Society**. v. 8. 2025. p. 100274. ISSN 2666-5581. <https://doi.org/10.1016/j.wss.2025.100274>.

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA A OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE TURBINAS EM PARQUES EÓLICOS OFFSHORE

**Italo Firmino da Silva¹, Guilherme Trajano¹, Telles Brunelli Lazzarin²,
Lenon Schmitz², Alison R. Panisson¹**

¹ Departamento de Computação - Universidade Federal de Santa Catarina
italo.silva@grad.ufsc.br, guilherme.trajano@grad.ufsc.br, alison.panisson@ufsc.br

² Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica - Universidade Federal de Santa Catarina
telles.bl@ufsc.br, lenon.schmitz@ufsc.br,

Resumo: Parques eólicos offshore apresentam elevado potencial de geração de energia devido a ventos mais intensos e consistentes, mas seus altos custos de instalação e manutenção exigem análises de otimização criteriosas. Este trabalho propõe um framework que integra técnicas de inteligência artificial e visualização para apoiar a fase de projeto de parques eólicos, com foco na definição otimizada do arranjo das turbinas. A abordagem considera condições históricas de vento e os efeitos de esteira, buscando maximizar a produção de energia e reduzir perdas por interferência entre turbinas. Os resultados indicam modularidade e desempenho competitivo do framework proposto, evidenciando sua eficácia para análises de otimização em projetos de parques eólicos offshore.

Palavras-chave: Inteligência Artificial, Otimização, Energia Eólica

1 INTRODUÇÃO

A transição energética global tem impulsionado a busca por fontes renováveis capazes de atender à crescente demanda por eletricidade de forma sustentável. Nesse cenário, os parques eólicos offshore destacam-se por apresentarem ventos mais intensos e consistentes, resultando em maior potencial de geração quando comparados a projetos onshore. No entanto, a implementação desses empreendimentos exige investimentos elevados em infraestrutura e manutenção, o que torna indispensável a realização de análises de otimização que assegurem viabilidade econômica e máxima eficiência energética (Hou et al., 2016).

Um dos principais desafios no planejamento de parques eólicos offshore está na definição do arranjo das turbinas, uma vez que o posicionamento influencia diretamente a produção de energia. A interação entre turbinas e os efeitos de esteira podem reduzir significativamente o rendimento global do sistema, com perdas estimadas entre 10–15% da produção anual de energia (Barthelmie et al., 2006). Assim, métodos de otimização que considerem dados históricos de vento e modelos de esteira são essenciais para apoiar a tomada de decisão na fase de projeto, reduzindo riscos e aumentando a competitividade dos investimentos.

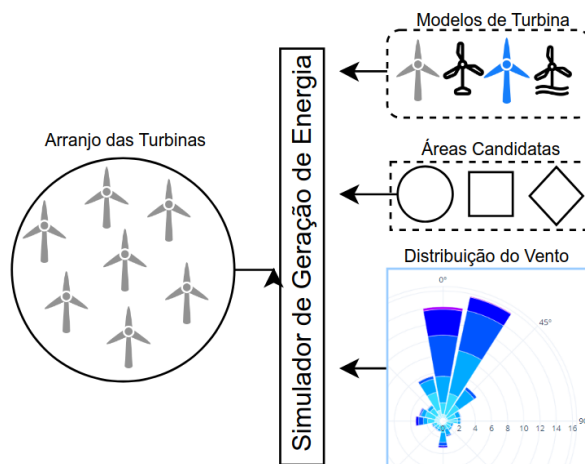
Este trabalho propõe um framework modular para análise e otimização de projetos de parques eólicos offshore. A abordagem integra algoritmos de inteligência artificial para explorar diferentes arranjos de turbinas, ferramentas de simulação para estimar a produção de energia, e ferramentas de visualização. O objetivo é oferecer suporte

ao processo de planejamento, permitindo a avaliação de múltiplos fatores que impactam o desempenho do empreendimento, auxiliando na identificação de arranjos que maximizem a geração de energia e minimizem perdas por interferência.

2 METODOLOGIA

O desenvolvimento do framework proposto nesse trabalho fundamenta-se em uma ferramenta computacional apresentada em (Baker et al., 2019) na qual é possível configurar variáveis essenciais para a análise de projetos de parques eólicos offshore, como o tipo de turbinas a serem utilizadas, a localização da implantação, incluindo sua configuração geométrica e o histórico de incidência de ventos, e diferentes cenários de arranjos. A ferramenta utilizada permite estimar a geração de energia anual (AEP) considerando as perdas associadas ao efeito de esteira, além de viabilizar a comparação de resultados obtidos com benchmarks consolidados, apresentados em (Baker et al., 2019), fornecendo uma base para a análise de desempenho da abordagem proposta. Uma visão geral da ferramenta pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 – Visão geral de inputs configuráveis do simulador.

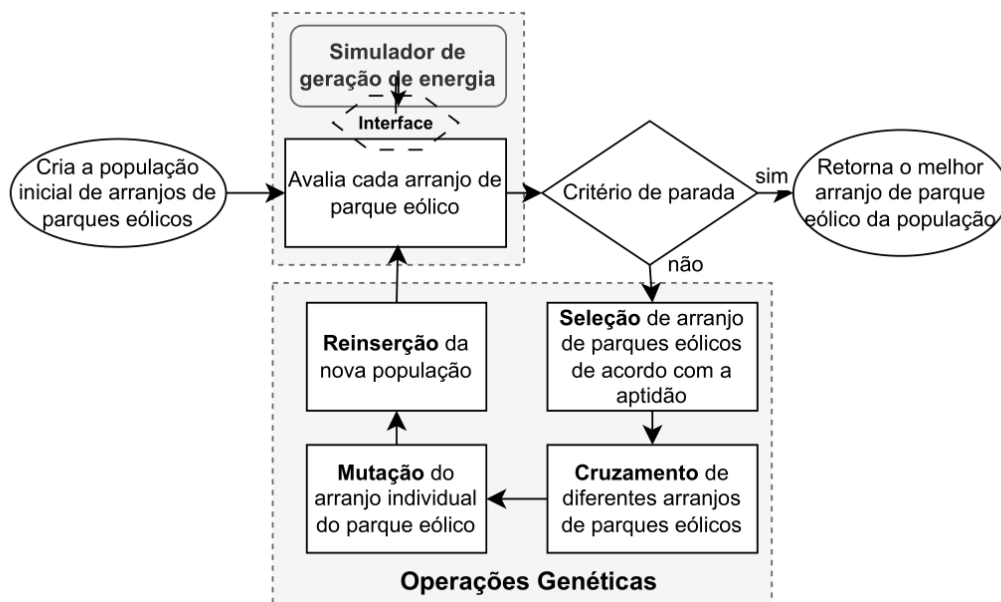


Fonte: os Autores

A partir dessa ferramenta, foi incorporado ao framework um algoritmo genético (AG) projetado para avaliar, a cada interação, múltiplas soluções de arranjos de turbinas. O AG avalia, combina e modifica iterativamente essas soluções, de modo a evoluir a população de arranjos gerados e convergir para configurações otimizadas. A AEP de cada arranjo é calculada pela ferramenta, fornecendo base de comparação (Da Silva et al., 2025). Para a execução do algoritmo, definiu-se uma população de 300 arranjos, evoluída

por um máximo de 1500 gerações. A seleção foi realizada por torneio com grupos de 5 indivíduos, e a variação genética foi introduzida por mutação gaussiana ($\mu=0$, $\sigma=100$). Enquanto estes definem a estrutura base do algoritmo, as probabilidades de cruzamento, de mutação e de mutação individual por gene foram calibradas por meio de uma busca em grade. Essa busca foi focada nestes três hiperparâmetros-chave, pois uma análise de poder estatístico prévia (Faul et al., 2007) demonstrou serem os de maior impacto na AEP. Dessa forma, o processo de busca exploratória é automatizado, ampliando a eficiência da análise e aumentando a probabilidade de identificar arranjos que maximizem a produção de energia e reduzam perdas por interferência entre turbinas. A Figura 2 apresenta o fluxograma de execução do algoritmo e sua integração com o simulador.

Figura 2 – Algoritmo genético integrado à ferramenta de simulação.



Fonte: os Autores

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

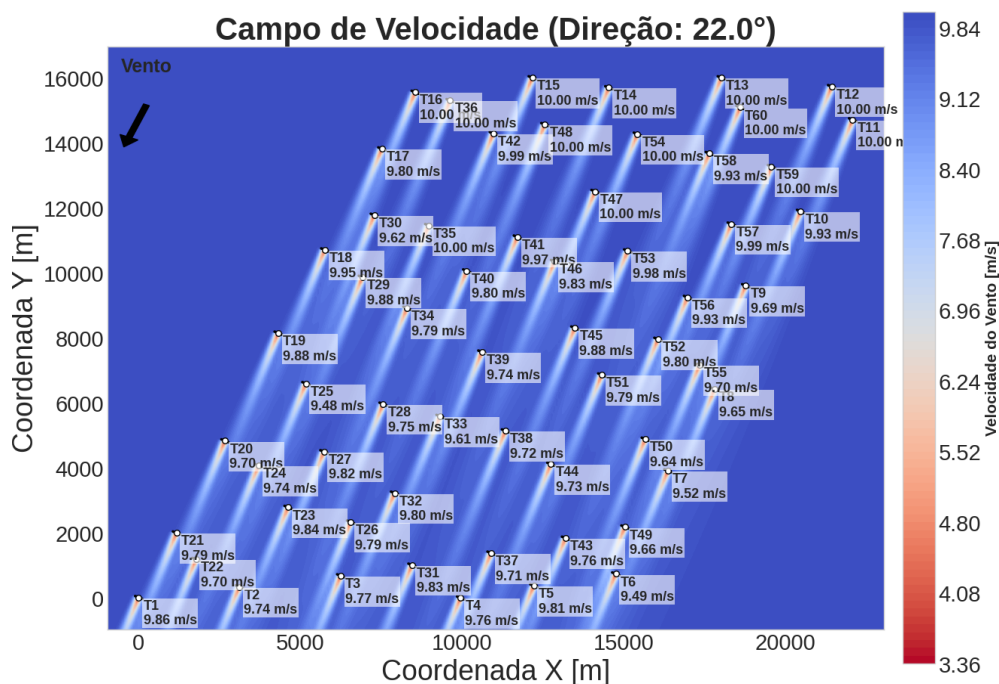
A partir do desenvolvimento do framework, procedeu-se à sua avaliação em cenários disponíveis na literatura (Baker et al., 2019). Esses cenários fornecem uma base consolidada para comparação de desempenho e apresentam variações no número de turbinas por arranjo, 16, 36 e 64, respectivamente, em áreas de extensão fixa, o que torna os casos com maior número de turbinas mais desafiadores para otimização.

Comparando os resultados obtidos com os benchmarks apresentados em (Baker et al., 2019), o framework desenvolvido, em especial o componente de otimização,

demonstrou desempenho competitivo. Nos cenários de 16 e 36 turbinas, a abordagem proposta alcançou a segunda colocação geral (primeira entre algoritmos da mesma classe, livres de gradiente), com aumento de 13,6% e 15,8% na AEP, respectivamente, em relação aos casos base do benchmark. No cenário de 64 turbinas, o método atingiu a quarta colocação (novamente em primeiro lugar entre algoritmos livres de gradiente), com aumento de 14,2% na AEP. Um detalhamento dos resultados pode ser encontrado em (Da Silva et al., 2025).

Com esses resultados, validou-se o componente de otimização do framework. Em seguida, este foi integrado a um módulo de visualização, que permite representar graficamente não apenas o posicionamento do arranjo de turbinas, mas também os efeitos de esteira e a interação entre turbinas, considerando dados históricos de vento da localidade. A Figura 3 ilustra a saída do módulo de visualização em um estudo de caso real, referente ao plano de instalação de um parque eólico no litoral de Mostardas, Rio Grande do Sul.

Figura 3 – Resultado da ferramenta de visualização.



Fonte: os Autores

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O framework desenvolvido representa um avanço significativo no uso de técnicas de inteligência artificial aplicadas ao suporte a projetos de geração de energia

eólica offshore. Sua contribuição está na viabilização de análises mais precisas durante a fase de projeto, favorecendo a definição de arranjos otimizados de turbinas e, conseqüentemente, aumentando a eficiência da geração de energia. Com isso, investimentos de grande magnitude nesse setor tornam-se ainda mais atrativos, uma vez que o framework auxilia na redução de riscos e na maximização da produção ao longo da vida útil do empreendimento.

Resultados mais recentes demonstram ganhos adicionais obtidos por meio do refinamento do algoritmo de otimização, evidenciando a robustez e o potencial do framework em alcançar arranjos de turbinas ainda mais eficientes. Paralelamente, uma interface de linguagem natural está em desenvolvimento para simplificar a configuração de cenários, transformando o sistema em uma plataforma interativa de apoio à decisão.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), Brasil. Processo nº 407826/2022-0.

REFERÊNCIAS

BAKER, N.F., STANLEY, A.P., THOMAS, J.J., NING, A. and DYKES, K. **Best practices for wake model and optimization algorithm selection in wind farm layout optimization**. In AIAA Scitech 2019 forum (p. 0540), 2019.

BARTHELMIE, R., LARSEN, G.C., FRANDSEN, S.T., FOLKERTS, L., RADOS, K., PRYOR, S.C., LANGE, B. and SCHEPERS, G. Comparison of wake model simulations with offshore wind turbine wake profiles measured by sodar. **Journal of atmospheric and oceanic technology**, v.23, n.7, pp.888-901, 2006.

DA SILVA, I.F., LAZZARIN, T.B., SCHMITZ, L. and PANISSON, A.R. **Optimizing Wind Farm Project Assessments Using Genetic Algorithms**. In Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion (pp. 811-814), 2025.

HOU, P., HU, W., CHEN, C., SOLTANI, M. and CHEN, Z. Optimization of offshore wind farm layout in restricted zones. **Energy**, v.113, pp.487-496, 2016.

FAUL, F., ERDFELDER, E., LANG, A.G. and BUCHNER, A. G*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. **Behavior research methods**, v.39, n.2, pp.175-191, 2007.

ADAPTAÇÃO E RESILIÊNCIA ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA ILHA DO PAVÃO - PORTO ALEGRE / RS

Katiucia Alf Santos¹, Kátia Cilene Madruga², Márcio Rosa D'Ávila³

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade.
E-mail: katiucia.alf@gmail.com

² Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade.
E-mail: katiamadruaga08@gmail.com

³ Curso de Arquitetura e Urbanismo da Escola Politécnica da PUCRS, Brasil.
E-mail: marcio.davila@pucrs.br

Resumo: Este estudo investiga as dimensões da adaptação e da resiliência às mudanças climáticas na Ilha do Pavão, localizada no Arquipélago do Guaíba, em Porto Alegre (RS), tomando-a como território representativo das vulnerabilidades urbanas em contextos insulares. A comunidade, composta majoritariamente por população negra, indígena e por mulheres, enfrenta vulnerabilidades estruturais e recorrentes enchentes, intensificadas pelo evento extremo de maio de 2024. Diante desse cenário, a pesquisa tem como objetivo analisar a capacidade adaptativa local, relacionando estratégias comunitárias de enfrentamento a referências internacionais sobre resiliência urbana. Para tanto, adota-se uma abordagem qualitativa e exploratória, combinando revisão bibliográfica e documental com pesquisa de campo. O estudo será estruturado em dois artigos: o primeiro, fundamentado em revisão sistemática da literatura e análise temática, identifica os principais aspectos relacionados às mudanças climáticas e à resiliência urbana em escala global; o segundo analisa, a partir de um estudo de caso, as respostas da comunidade da Ilha do Pavão no acesso à energia e à água antes, durante e após a enchente de 2024, buscando mapear lacunas em serviços essenciais e fortalecer estratégias de autogestão comunitária como contribuição prática à justiça climática. Os resultados preliminares indicam que os processos de resiliência na Ilha do Pavão são sustentados principalmente pela ação comunitária e pela solidariedade local, em contraste com a ausência de políticas públicas eficazes. Espera-se que a pesquisa contribua ao ampliar a compreensão sobre a resiliência urbana em territórios vulneráveis, evidenciando desafios, lacunas e oportunidades para o fortalecimento das capacidades locais frente às emergências climáticas.

Palavras-chave: mudanças climáticas, planejamento urbano, resiliência urbana, resiliência comunitária

1 INTRODUÇÃO

O cenário global atual está caracterizado pela intensificação de eventos climáticos extremos, que impõem desafios significativos às cidades, sobretudo nas áreas urbanas mais vulneráveis e periféricas. Enchentes, secas e falhas nos sistemas de abastecimento, entre outros fenômenos, revelam tanto as fragilidades estruturais dos territórios quanto as desigualdades socioespaciais no acesso a serviços essenciais e na capacidade de adaptação. Nesse contexto, as cidades tornam-se, espaço das causas e das respostas à crise climática, revelando uma lacuna entre políticas públicas limitadas e práticas comunitárias emergentes (IPCC, 2023; UN-Habitat, 2023).

A resiliência urbana constitui uma abordagem relevante para ampliar a capacidade das populações e instituições de enfrentar, absorver e adaptar-se a situações adversas. Essa capacidade está relacionada à inovação, a diversidade de funções e no planejamento voltado ao fortalecimento dos ecossistemas urbanos, exigindo a integração de múltiplos subsistemas em diferentes níveis de governança (Magalhães; Danilevicz; Souza; Echeveste, 2022). Mais do que responder a eventos extremos, trata-se de conceber

a cidade como um sistema em constante transformação, sobretudo em contextos periféricos, nos quais a presença do Estado é limitada e os riscos se intensificam em razão das desigualdades socioespaciais. Nesses territórios, a resiliência comunitária surge como elemento fundamental, construída a partir de laços de solidariedade, do compartilhamento de saberes e da adoção de estratégias locais de enfrentamento, sustentada por redes sociais e vínculos que frequentemente substituem ou complementam a ação institucional (Castilho; Fernandes; Ferreira, 2023; Villagra; Lima; Cardoso, 2023).

A Ilha do Pavão, situada no Arquipélago do Guaíba, em Porto Alegre (RS), representa um território exemplar para investigar como comunidades periféricas e insulares articulam resiliência urbana, justiça climática e autogestão diante de eventos extremos. Composta majoritariamente por população negra, indígena e por mulheres, a comunidade enfrenta deficiências estruturais, como precariedade no saneamento básico, ligações irregulares de água e energia e exposição recorrente a enchentes. A inundação ocorrida em maio de 2024, que impactou severamente a região, evidenciou a ausência de políticas públicas eficazes e ressaltou como os processos de resiliência são, em grande medida, sustentados pelas próprias comunidades (Pasko, 2024). Das 156 famílias residentes, todas foram atingidas: algumas perderam integralmente suas moradias, arrastadas pela água, enquanto outras tiveram suas estruturas gravemente comprometidas. No período pós-enchente, os terrenos desocupados foram declarados sem propriedade, negando às famílias o direito de retorno. Em contrapartida, habitações que permaneciam de pé, ainda que em condições inseguras e precárias, foram consideradas aptas para reocupação (Pasko, 2024). Apesar da gravidade do evento, a ausência de respostas institucionais efetivas reforçou a necessidade de investigar as potencialidades e limites da resiliência comunitária. Este estudo, portanto, por buscar preencher a lacuna de análises empíricas que articulem resiliência urbana e estratégias de autogestão em territórios insulares.

2 METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem qualitativa e exploratória, articulando revisão bibliográfica e documental com pesquisa de campo. A revisão sistemática da literatura busca identificar os principais aspectos relacionados às mudanças climáticas e à resiliência urbana no contexto global. O recorte temporal considera os últimos dez anos, e a análise é conduzida por meio de categorização temática, permitindo organizar as contribuições teóricas e evidenciar lacunas de pesquisa e o resultado será apresentado em formato de artigo que demonstra dos dados em resposta ao objetivo da revisão sistemática.

A etapa empírica será desenvolvida por meio de estudo de caso na Ilha do Pavão, em Porto Alegre, onde serão aplicadas questões semiestruturadas, via questionário online, a diferentes atores sociais selecionados segundo critérios de engajamento comunitário, participação durante a enchente de maio de 2024 e vínculo com organizações locais (como a Associação Vitória e a Assessoria Técnica Pavão Resiste). O levantamento abrangerá dados anteriores, durante e posteriores à enchente de maio de 2024, com o propósito de identificar soluções implementadas pela população local, bem como mapear lacunas e oportunidades de fortalecimento da resiliência comunitária. A metodologia de análise dos dados integrará uma revisão documental (relatórios, registros institucionais, mapas e imagens) e a aplicação do questionário semiestruturado, assegurando consistência e triangulação dos dados.

3 RESULTADOS PRELIMINARES E ESPERADOS

3.1 Resultados Preliminares

Até o presente momento, as atividades de pesquisa vinculadas aos objetivos deste estudo concentraram-se na elaboração do referencial teórico e no desenvolvimento do primeiro artigo científico, correspondente ao objetivo específico I, além disso, atualmente a segunda parte do projeto está em apreciação e análise do Comitê Ética, aguardando retorno para aplicação dos questionários.

O artigo intitulado *“Cidade resiliente ou adaptável? O acesso à energia e a resposta às mudanças climáticas: uma revisão”* tem como objetivo apresentar um panorama geral das publicações sobre a temática das cidades resilientes, por meio de uma revisão bibliográfica dos estudos publicados nos últimos dez anos e pode indicar que a literatura sobre resiliência urbana privilegia análises de recuperação pós-desastre, enquanto há escassez de estudos voltados a territórios vulneráveis e estratégias comunitárias de autogestão. O manuscrito será submetido à Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento (RBDP), classificada como A3 no Qualis Capes Único 2019, vinculada à área de Engenharias III. Com ISSN 2317-2363, a revista é editada pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e publica pesquisas científicas que contribuam de forma relevante para o avanço do conhecimento em planejamento e desenvolvimento, com ênfase nas dimensões regional e territorial (RBDP, 2025).

As observações iniciais da segunda parte da pesquisa evidenciam através de documentos e informações coletadas que, na Ilha do Pavão, a resiliência tem sido construída, sobretudo por meio de redes de solidariedade, apoio mútuo e organização

comunitária, em contraste com a limitada atuação do poder público. Para sistematizar esses dados, estão em desenvolvimento categorias de análise preliminares, como acesso à água, energia, ações comunitárias e ações institucionais, que servirão de base para sínteses temáticas e quadros analíticos.

3.2 Resultados Esperados

É esperado que a pesquisa identifique de forma sistemática as lacunas no acesso a serviços essenciais, especialmente água e energia, bem como as estratégias locais de enfrentamento à emergência climática e resiliência urbana. Além disso, busca-se compreender as potencialidades da autogestão comunitária como alternativa para fortalecer a resiliência urbana em contextos periféricos e insulares. Os resultados poderão oferecer subsídios práticos para o planejamento urbano e para a formulação de políticas públicas mais inclusivas, ao mesmo tempo em que ampliam o debate acadêmico sobre justiça climática, demonstrando como experiências locais podem contribuir para a construção de cidades mais justas e adaptáveis frente às mudanças climáticas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise preliminar evidencia que a Ilha do Pavão representa um espaço emblemático para a compreensão da resiliência urbana em contextos de vulnerabilidade social e territorial. As estratégias desenvolvidas pela própria comunidade diante da enchente de maio de 2024 ressaltam a importância das redes de solidariedade, da mobilização local e da participação social como elementos centrais na adaptação às mudanças climáticas. Ao mesmo tempo, revela-se a ausência de políticas públicas eficazes e de mecanismos institucionais capazes de oferecer suporte adequado às populações mais afetadas, ampliando os riscos e a insegurança socioespacial.

Nesse sentido, a pesquisa busca contribuir ao sistematizar as potencialidades e limitações da resiliência comunitária e urbana, oferecendo subsídios para gestores, planejadores e pesquisadores interessados em construir cidades mais preparadas e inclusivas diante de emergências climáticas. Os resultados esperados apontam para a necessidade de ampliar a integração entre conhecimento científico e práticas comunitárias, assim como fortalecer a governança colaborativa e multiescalar, a fim de reduzir desigualdades e promover justiça climática em territórios periféricos e insulares.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal de Santa Catarina (PPGES/UFSC) pelo apoio institucional ao desenvolvimento desta pesquisa. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento e incentivo à pesquisa científica no país, fundamentais para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

CASTILHO, C. M. de; FERNANDES, V. L. S.; FERREIRA, I. C. S. A resiliência urbana e a sustentabilidade em cidades latino-americanas: uma análise a partir de marcos conceituais. **Cidades**, v. 20, n. 2, 2023. Disponível em: <https://journals.openedition.org/cidades/3348?lang=pt>. Acesso em: 14 maio 2025.

IPCC, 2023: **Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report.** Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

MAGALHÃES, Ruane Fernandes de; DANILEVICZ, Ângela de Moura Ferreira; SOUZA, Joana Siqueira de; ECHEVESTE, Marcia Elisa. The risk management tools'role for urban infrastructure resilience building. **Urban Climate**, [S.L.], v. 46, p. 101296, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101296>.

UN-HABITAT, United Nations Human Settlements Programme. **Orld Cities Report 2024 Cities and Climate Action**. P.O. Box 30030, Nairobi, Kenya: United Nations Human Settlements Programme, 2024, 2024. 373 p. (978-92-1-133395-4).

VILLAGRA, J. F. M.; LIMA, P. M.; CARDOSO, M. M. **Saberes locais e resiliência comunitária: caminhos para a inclusão territorial em contextos periféricos**. Anais do Programa de Desenvolvimento de Pesquisas em Políticas Públicas (PDPP). Porto Alegre: UFRGS, 2023. Disponível em: <https://www.pdpp2025.sinteseeventos.com.br/arquivo/downloadpublic?q=eyJwYXJhbXMiOiJ7XCJJRF9BUiFVSZPXCi6XCiZnZQ4XCj9liwiaCi6ImEwOWIwOGI1ZjhlOTFkZGllWmWZkMzRIOTc3OGYwMmUwIn0%3D>. Acesso em: 14 maio 2025.

PASKO, Priscila. **Pescadores artesanais e moradores das ilhas de Porto Alegre têm sua cultura e futuro ameaçados após enchente**. 2024. Disponível em: <https://pulitzercenter.org/pt-br/stories/pescadores-artesanais-e-moradores-das-ilhas-de-porto-alegre-tem-sua-cultura-e-futuro>. Acesso em: 14 maio 2025.

MODELAGEM PARAMÉTRICA E FABRICAÇÃO ADITIVA DE TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO PORTE: UMA PROPOSTA PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA INCLUSIVA

Andrei Leandro Morsch Franco¹, Carla de Abreu D'Aquino¹,
Luciano Lopes Pfitscher¹, Maicon Coelho Evaldt²

¹ UFSC/PPGES/andrei.franco@ifsc.edu.br, carla.daquino@ufsc.br, luciano.pfitscher@ufsc.br

² UNILA/ILATIT/maicon.evaldt@unila.edu.br

Resumo: A transição energética global, impulsionada pela necessidade de mitigar as mudanças climáticas, enfrenta um obstáculo significativo: o elevado custo inicial das tecnologias renováveis, que limita a adoção por populações de baixa renda e em comunidades rurais. Este trabalho apresenta uma proposta metodológica para o desenvolvimento de uma unidade de geração eólica de pequeno porte e baixo custo, destinada a sistemas de geração distribuída residenciais. O objetivo é demonstrar a viabilidade da fabricação aditiva (impressão 3D) e do uso de softwares de design paramétrico de código aberto como ferramentas para democratizar o acesso à energia eólica, fomentando cadeias produtivas locais e promovendo uma transição energética mais inclusiva.

O itinerário metodológico abrange desde a modelagem computacional integrada do sistema (turbina, gerador, conversor e rede) utilizando Python e OpenSCAD, com a previsão de construção de um protótipo funcional. O foco recai em uma turbina helicoidal de eixo vertical, otimizada para ambientes costeiros, e um gerador síncrono de ímã permanente projetado para operar eficientemente em baixas velocidades de vento. Materiais compósitos reforçados, como filamentos de PLA com fibra de carbono, são considerados para garantir durabilidade. Embora em etapas iniciais, resultados preliminares promissores incluem o desenvolvimento de scripts em Python e modelos 3D paramétricos configuráveis da turbina e do gerador no OpenSCAD, validando a abordagem de design. Essa combinação tecnológica tem o potencial de reduzir drasticamente os custos de projeto e fabricação, empoderando comunidades e acelerando a adoção de energia renovável.

Palavras-chave: Transição energética; manufatura aditiva; turbina eólica; geração distribuída; baixo custo.

1 INTRODUÇÃO

A urgência da transição energética global para fontes renováveis é um consenso, impulsionada pela necessidade de mitigar as mudanças climáticas e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Contudo, a efetivação dessa transição depende não apenas de avanços tecnológicos, mas também da sua acessibilidade econômica e social. No Brasil, e especificamente em regiões como o extremo sul de Santa Catarina, estudos recentes apontam que o custo é o principal fator restritivo para a adoção de sistemas de geração distribuída (GD), como a solar fotovoltaica, especialmente em áreas rurais e costeiras (POSSAMAI; D'AQUINO, 2024).

Essas comunidades, muitas vezes localizadas no final das redes de distribuição, sofrem com a baixa qualidade e disponibilidade de energia elétrica (D'AQUINO *et al.*, 2023). Paradoxalmente, a região possui um significativo potencial eólico ainda inexplorado em pequena escala (PIRES *et al.*, 2020). As turbinas eólicas de pequeno porte disponíveis no mercado geralmente apresentam custos elevados e eficiência reduzida, tornando-as economicamente inviáveis para aplicações residenciais e frustrando tentativas anteriores de desenvolver soluções de baixo custo social (BARP *et al.*, 2016).

Neste contexto, a manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, surge como uma tecnologia disruptiva com o potencial de reduzir custos e resíduos, para criar soluções energéticas mais sustentáveis (LEONG *et al.*, 2023).

Portanto, este trabalho é um recorte de um projeto amplo que objetiva o desenvolvimento de um protótipo completo de unidade de geração eólica (turbina, gerador e conversor de potência) de baixo custo, utilizando a fabricação aditiva e ferramentas de design paramétrico de código aberto. A finalidade é propor um modelo que seja economicamente viável e socialmente inclusivo, permitindo que a energia eólica se torne uma opção real para a geração distribuída residencial.

2 METODOLOGIA

A metodologia proposta para o desenvolvimento do sistema de geração eólica de baixo custo é dividida em etapas integradas, que sorve da concepção digital e está fundamentada em tecnologias de código aberto e fabricação digital.

2.1 Concepção e Modelagem Paramétrica

A primeira fase consiste na modelagem integrada do sistema, fundamentada na metodologia de Co-Design de Controle (CCD) para otimizar simultaneamente o formato do rotor e a estratégia de controle (JIANG *et al.*, 2024). Para garantir a acessibilidade e a replicabilidade, todo o desenvolvimento matemático foi realizado em Python, que engloba a simulação da unidade de geração, composta por turbina, gerador, conversor e rede de distribuição.

Os dados fornecidos pelo código em Python são utilizados para a modelagem 3D da turbina e do gerador. A modelagem 3D foi feita no OpenSCAD, um software de CAD paramétrico baseado em script, que permite a criação de modelos tridimensionais a partir da alteração de parâmetros em um arquivo de texto (MACHADO *et al.*, 2019). Essa abordagem permite customizar e otimizar as peças, ajustando variáveis como o perfil aerodinâmico (NACA), o ângulo de torção, geometria e o número de pás.

2.2 Fabricação Aditiva e Materiais

Com base nos parâmetros otimizados na etapa de modelagem, os modelos 3D são gerados e preparados para a fabricação. A prototipagem será realizada majoritariamente por meio de impressão 3D, o que minimiza o desperdício de material e permite a criação de geometrias helicoidais complexas de forma eficiente.

Para assegurar a durabilidade e a resistência mecânica, especialmente em ambientes costeiros sujeitos à corrosão salina, serão empregados materiais compósitos. A proposta prevê o uso de filamentos de polímeros como o Ácido Polilático (PLA) reforçados com fibra de carbono, que conferem leveza e rigidez estrutural. As peças impressas poderão receber um tratamento superficial com resinas e laminação compósita (fibra de vidro ou carbono) para aumentar a resistência ao intemperismo e à bioincrustação, um desafio comum em aplicações marítimas (MAT YAZIK *et al.*, 2024).

2.3 Desenvolvimento do Sistema Integrado

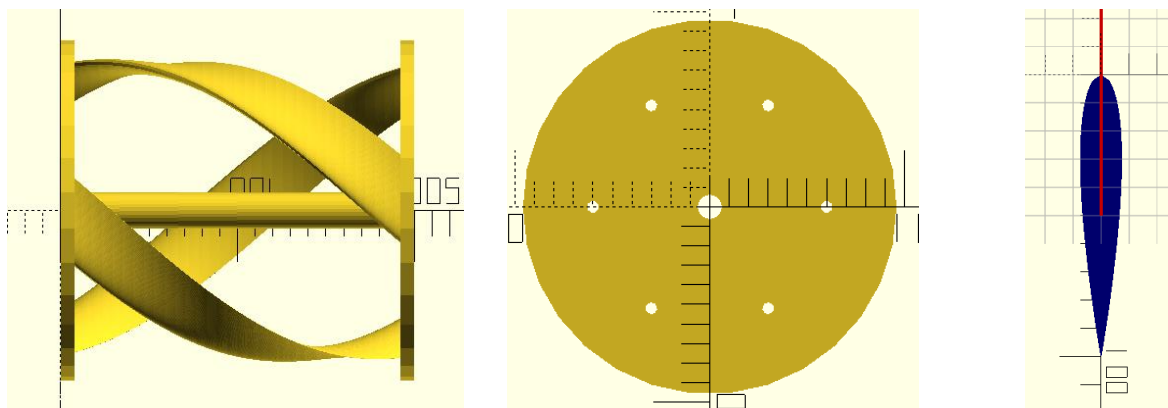
O projeto abrange a unidade de geração completa. Além da turbina, será desenvolvido um gerador síncrono de ímã permanente de fluxo axial, projetado para ter alto desempenho em baixas velocidades de vento. O projeto do gerador emprega metodologia e ferramentas idênticas às da turbina.

Após testes e comissionamento em laboratório, está prevista a instalação da unidade de geração em residência localizada na região litorânea. Concomitantemente com a análise do funcionamento, será conduzido um estudo de aceitação social, com aplicação de questionários e entrevistas com a comunidade no entorno e com os moradores da residência para avaliar a percepção sobre a tecnologia, incluindo aspectos como impacto visual e sonoro (RUSSELL; FIRESTONE, 2022).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Embora as atividades estejam na etapa inicial, resultados preliminares já foram alcançados na etapa de modelagem paramétrica. Foram desenvolvidos script em Python, os modelos 3D da turbina helicoidal (Figura 1) e do gerador de fluxo axial (Figura 2) no OpenSCAD.

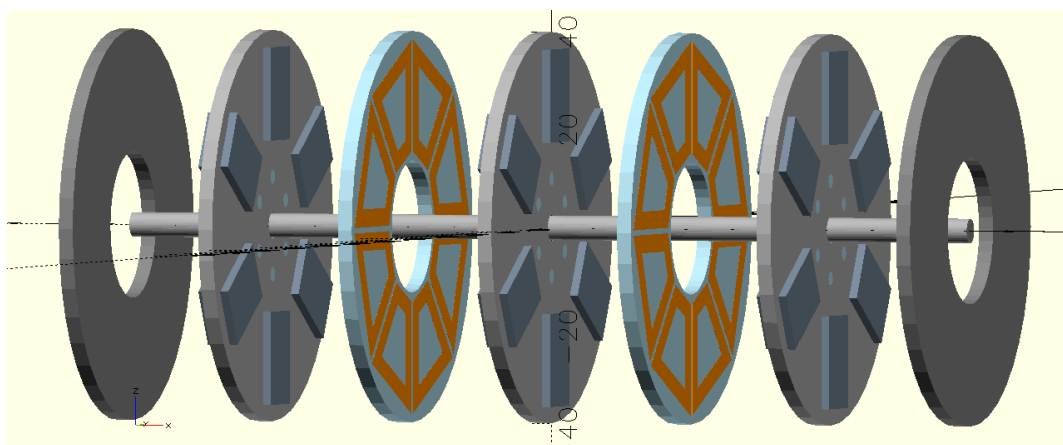
Figura 01 – Modelo Paramétrico da Turbina



Fonte: Autoria própria

Após ler as informações relacionadas à turbina, o software renderiza automaticamente o modelo 3D correspondente, o qual pode ser exportado para impressão. De forma análoga, o modelo do gerador, descrito na Figura 2, também é paramétrico. O script permite configurar o número e o tamanho dos ímãs, a geometria das bobinas e a estrutura do estator e do rotor, possibilitando que o gerador seja adequado para operar em diversas condições.

Figura 02 – Modelo Paramétrico do Gerador



Fonte: Autoria própria

A vista explodida do gerador, modelada no OpenSCAD, mostra as peças que serão impressas em 3D (suportes do rotor e estator), os espaços para a inserção dos ímãs permanentes e o posicionamento das bobinas.

A discussão central que emerge desses resultados preliminares é o potencial de disrupção do modelo tradicional de fabricação. A combinação do design paramétrico com a impressão 3D não apenas reduz o custo direto de fabricação, mas também democratiza o próprio processo de inovação. Isso fomenta o surgimento de Arranjos Produtivos Locais (APL), para geração de emprego e renda, além de transformar consumidores de energia em produtores ativos (prosumidores).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta uma proposta metodológica para o desenvolvimento de turbinas eólicas de pequeno porte e baixo custo, fundamentada na utilização estratégica da manufatura aditiva e de ferramentas de código aberto. A abordagem proposta apresenta uma solução para superar a principal barreira para a ampla adoção da geração distribuída renovável: o alto custo de investimento.

A metodologia integrada, perpassa simulação computacional, estudo de caso real e análise da aceitação social; garante uma avaliação holística da viabilidade da

solução. Os resultados preliminares da modelagem paramétrica indicam que é possível simplificar e baratear drasticamente o processo de projeto e fabricação de componentes complexos, como turbinas helicoidais e geradores de fluxo axial.

Ao criar uma solução de energia renovável acessível, replicável e adaptável, o projeto tem o potencial de fomentar a autonomia energética de comunidades, melhorar a qualidade de vida em regiões remotas, estimular a economia local e, fundamentalmente, contribuir para uma transição energética mais democrática e socialmente inclusiva.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento.

REFERÊNCIAS

BARP, J.; ROCCA, K.; FERREIRA, G.; SILVA, F.; STEFANON, S. Study on small wind power generator. **Business and Management Review**, v. 5, p. 21–30, 2016.

D'AQUINO, C. D. A.; MORETTO, E. M.; ZWARTJES, N. M.; LENIN DA SILVA, L.; SACHET, H. D. Design thinking methodology application to develop social acceptance questionnaire for renewable technologies. **Social Sciences & Humanities Open**, v. 10, p. 100912, 2024.

JIANG, B.; AMINI, M. R.; LIAO, Y.; NAIK, K.; MARTINS, J. R. R. A.; SUN, J. Control Co-Design of Hydrokinetic Turbines Considering Dynamic–Hydrodynamic Coupling. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, p. 1–13, 2024.

LEONG, W. Y.; LEONG, Y. Z.; LEONG, W. S. Accelerating the Energy Transition via 3D Printing. In: **2023 ASIA MEETING ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING** (EEE-AM), 2023, Hanoi, Vietnam. Anais... Hanoi, Vietnam: IEEE, 2023. p. 01–05.

MACHADO, F.; MALPICA, N.; BORROMEO, S. Parametric CAD modeling for open source scientific hardware: Comparing OpenSCAD and FreeCAD Python scripts. **PLOS ONE**, v. 14, n. 12, p. e0225795, 2019.

MAT YAZIK, M. H.; WEI SHYANG, C.; ISHAK, M. H. H.; ISMAIL, F. An overview of blade materials and technologies for hydrokinetic turbine application. **International Journal of Green Energy**, v. 21, n. 3, p. 476–499, 2024.

PIRES, C. H. M.; PIMENTA, F. M.; D'AQUINO, C. A.; SAAVEDRA, O. R.; MAO, X.; ASSIREU, A. T. Coastal Wind Power in Southern Santa Catarina, Brazil. **Energies**, v. 13, n. 19, p. 5197, 2020.

POSSAMAI, G. C. ; D'AQUINO, C. A. Percepção dos impactos da geração distribuída fotovoltaica na comunidade rural no extremo sul. In: V SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE - VSIMPPGES, 2024, Araranguá. **Anais do V Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade**. Araranguá: UFSC/PPGES, 2024. v. 1. p. 17.

RUSSELL, A.; FIRESTONE, J. Community cognitive and affective perceptions of land-based and ocean wind energy infrastructure. **Science Talks**, v. 4, p. 100090, 2022.

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE SEPARAÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS COMPONENTES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Halley Welther Jacques Dias¹, Renato Diaz de Santa Helena², Letícia Toreti Scarabelot³, Inácio Augusto Ignesi Acordi⁴, Gustavo Leopodino Costa⁵, Ana Laura de Souza Teixeira⁶

¹ Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Santa Catarina/Curso Técnico em Mecânica/halleydias@ifsc.edu.br

² Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Santa Catarina/Curso Técnico em Mecânica/renato.diaz@ifsc.edu.br

³ LEnergy Energia Solar/Diretoria Técnica/leticiascarabelot@yahoo.com.br

⁴ Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Santa Catarina/Curso Técnico Integrado em Eletromecânica/inacio.ia04@aluno.ifsc.edu.br

⁵ Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Santa Catarina/Curso Técnico em Eletromecânica/Gustavo.ic04@aluno.ifsc.edu.br

⁶ Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Santa Catarina/Curso Técnico em Eletromecânica/ana.st2009@aluno.ifsc.edu.br

Resumo: A geração de energia elétrica por meio de módulos fotovoltaicos é considerada de baixo impacto ambiental por ser livre de emissão dos gases provenientes da combustão de combustíveis fósseis e por utilizar fonte de energia renovável, o sol. Contudo, hoje em dia para um processo ser considerado amigo do meio ambiente, ele deve ser ao longo de todo o seu ciclo de vida e não mais apenas do ponto de vista operacional. Dentro deste contexto as usinas fotovoltaicas estão convivendo com a problemática do destino dos painéis obsoletos, pois o seu descarte, mesmo que em aterros sanitários produzem impactos ambientais desfavoráveis. Para enfrentar essa problemática, muitos esforços estão sendo dispensados na gestão da reciclagem dos módulos fotovoltaicos. Por se tratar de um material compósito, a primeira etapa da reciclagem destes módulos é a separação de seus materiais componentes. Ocorre que a separação de seus componentes não é trivial e este trabalho de pesquisa tem por objetivo desenvolver um método eficaz e eficiente de separação dos materiais componentes dos módulos fotovoltaicos. Para atingir esse objetivo foi testado um método químico no qual amostras foram imersas numa solução de misturas de solventes num banho ultrassônico. Após período de ataque de duas horas e meia foi possível separar de forma relativamente fácil praticamente todos os materiais componentes, todavia, a separação da célula fotovoltaica necessitou de uma etapa térmica adicional. Por fim, o método testado se mostrou promissor devido a separação de todos os materiais componentes com o mínimo de perdas.

Palavras-chave: Módulo fotovoltaico; reciclagem; descomissionamento; sustentabilidade ambiental; energia solar

1 INTRODUÇÃO

Hoje em dia o desenvolvimento civilizacional e a preservação ambiental são indissociáveis, exigindo esforços em escala global tanto de governos quanto da indústria de modo geral para atingir estes objetivos. A geração de energia elétrica é um dos grandes protagonistas nos esforços empregados para o desenvolvimento sustentável. De acordo com Miranda (2019), muitas fontes de energia ainda são poluentes, em especial aquelas consumidoras de combustíveis fósseis. A autora citada comenta que as atenções se concentram no desenvolvimento de fontes alternativas que possam ser consideradas limpas, renováveis e sustentáveis, ou seja, amigas do meio ambiente. Entre as alternativas, as fontes de geração via usinas fotovoltaicas ou solar têm merecido grandes destaques pois utilizam fonte renovável e não emitem gases provenientes. Contudo, ainda segundo a autora, para uma fonte geradora de energia ser considerada amiga do meio ambiente ela terá de ser ao longo de todas as etapas de seu ciclo de vida e não apenas na etapa

operacional. Entretanto, muitos países já sentem fortes impactos no meio ambiente devido a forma de tratamento posterior a obsolescência dos módulos fotovoltaicos (MF). Nesse contexto, a geração de energia fotovoltaica pode deixar de ser, sob determinados critérios, considerada amiga do meio ambiente.

O presente trabalho de pesquisa é de natureza aplicada pois contribui no desenvolvimento uma solução para um problema real com respeito ao fim do ciclo de vida dos MF, mais especificamente na etapa de descomissionamento. Os MF podem ser classificados como materiais compósitos e necessitam da separação de suas partes componentes para uma gestão de resíduos sólidos ambientalmente amigável. Os principais materiais componentes dos MF são o vidro, alumínio, cobre, silício ou célula fotovoltaica (CF), fluoreto de polivinila (PVF) e etileno acetato de vinila (EVA). De maneira geral, praticamente todos os materiais são recicláveis. O grande desafio está em separar ou desmontar o MF pois para operar durante seu tempo de vida útil de 25 anos, suas partes estão intimamente ligadas. Os principais métodos convencionais de separação utilizados são mecânicos e térmicos e uma terceira via que vem sendo desenvolvida atualmente é a química. Diante do exposto, o presente trabalho formulou como objetivo geral o desenvolvimento um método de separação química dos materiais componentes dos MF em fim de vida útil.

2 METODOLOGIA

A partir de um MF cedido pela Empresa LEnergy Energia Soldar foram retiradas amostras retangulares com dimensões médias de 45 mm por 30 mm, totalizando aproximadamente 11 g por amostra. Na sequência as amostras foram imersas num Becker com 100 ml de uma solução de xilol PA e diclorometano PA com composição de 75% e 25% respectivamente. A solução de solventes com as amostras imersas foi colocada num banho ultrassônico de 40 kHz e 180 W por 2,5 h em temperatura ambiente. Após essa etapa, procedeu-se a separação manual do vidro, da placa de fundo de PVF e dos condutores de cobre. A CF foi retirada desse banho envolvida numa cápsula gelatinosa de EVA, sendo necessária uma etapa adicional por via térmica numa temperatura de 400 °C por um tempo de 10 minutos. Nesse processo o EVA foi degradado e evaporado restando a CF em fragmentos. Os condutores de cobre são revestidos com liga de estanho e chumbo (Sn-Pb). A retirada dessa camada foi realizada também por via térmica submetendo os condutores numa temperatura de 700 °C por 10 min. Após esse período de tempo os fios são colocados um Becker com água em temperatura ambiente, devido ao choque térmico

a camada oxidada se desprende por simples raspagem e ao final foram submetidas num banho ultrassônico de 40 kHz e 180 W por 30 min para uma limpeza de acabamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A formulação das soluções com potencial para dissolver o EVA ou reduzir a sua tensão superficial foi a parte crucial da pesquisa. Dursun *et al* (2019) argumentam sobre as vantagens do EVA nos MF, é um poderoso adesivo, transparente e com estabilidade térmica. Tais vantagens, ainda segundo os autores, são fruto da fabricação do EVA envolver reticulação com peróxido de dicumila tornando-o um polímero termofixo dotado de elevada resistência mecânica e estabilidade foto oxidativa. Essas características também o tornam resistentes à dissolução tanto por solventes polares quanto apolares, sofrendo apenas um processo de solvatação parcial dependendo do seu grau de reticulação. Segundo Lou *et al* (2025), a utilização de solventes aromáticos apolares é uma forma de fragilizar as cadeias poliméricas individuais, pois, ao penetrar nos espaçamentos intermoleculares infla a matriz etilênica promovendo o relaxamento das cadeias. Com esse *background*, decidiu-se avaliar a sensibilidade do EVA aos seguintes solventes: xilol, orto-diclorobenzeno e diclorometano tanto nas suas formas puras como misturados. A composição com 75% de xilol e 25% de diclorometano num banho ultrassônico por 2,5 h apresentou melhores resultados na separação dos materiais componentes dos MF.

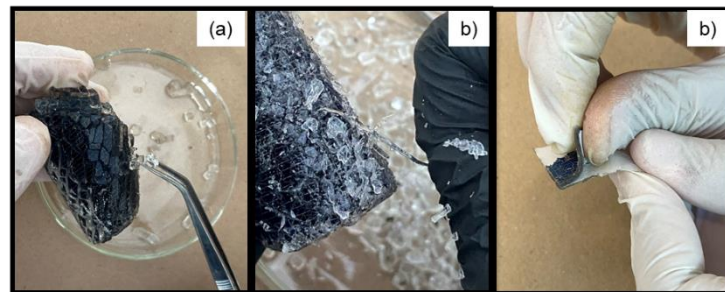
A tabela 1 traz informações sobre o percentual do balanço de massas dos experimentos realizados comparativamente com os dados dos referenciais bibliográficos. É possível observar que estes resultados estão na mesma ordem de grandeza, significando que a metodologia utilizada foi eficaz e com um mínimo de perdas. A facilidade com que os materiais foram separados manualmente ou com auxílio de pinças está ilustrado na Figura 1. Ao fim do processo, todos os materiais estão em condições de reciclagem, observa-se que tanto vidro quanto fundo PVF são separados em condições de reciclagem direta.

Tabela 01 – Comparação da composição mássica dos materiais separados das amostras dos MF em relação aos registrados na bibliografia

Material	Experimento [%]	Bibliografia [%]
Vidro	79,0	81,9
Fundo PVF	4,9	5,0
EVA	11,9	8,2
CF	3,9	4,7
Cobre	0,3	0,3

Fonte: autores, 2025.

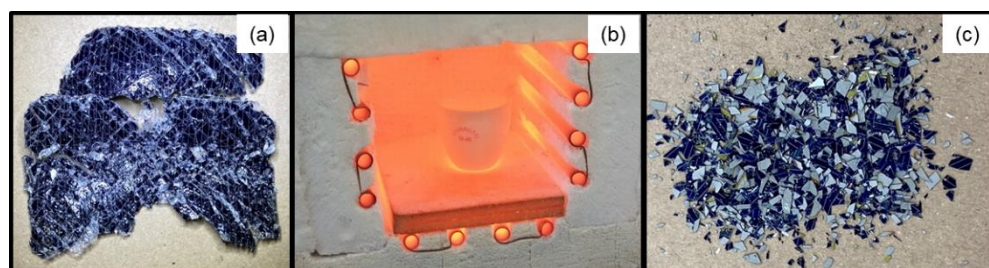
Figura 01 – Separação do MF após o ataque químico: a) vidro; b) fio cobre; c) PVF e CF.



Fonte: autores, 2025

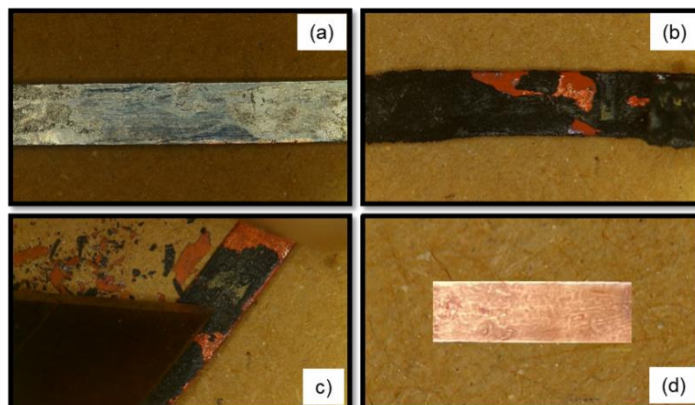
Na Figura 2 estão apresentadas a CF encapsulada pelo EVA e os fragmentos após o tratamento térmico (TT). Como não foi possível isolar a CF de forma íntegra, é razoável assumir que o silício obtido está na sua forma metalúrgica para ser reciclado. A sequência do tratamento dos condutores de cobre após a separação química está ilustrada na Figura 3. O destino dos condutores pode tanto ser para a metalurgia de ligas de cobre como para produção de cobre eletrolítico desde que eliminada a camada Sn-Pb.

Figura 02 – Tratamento térmico para eliminação da cápsula de EVA: a) CF encapsulada; b) forno mufla a 400 °C por 10 min; c) fragmentos da CF.



Fonte: autores, 2025

Figura 03 – Retirada da camada de estanho-chumbo do condutor de cobre: a) condutor recoberto com Sn-Pb; b) Sn-Pb oxidada após TT; c) raspagem da camada oxidada; d) condutor de cobre após banho ultrassônico de 30 minutos



Fonte: autores, 2025

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final dos experimentos concluiu-se que o processo químico de separação dos materiais componentes dos MF alcançou êxito. É um processo relativamente rápido, foi realizado em menos de 4 horas desde o corte das amostras até a separação total dos materiais. Por fim, a empresa LEnergy Energia Solar, parceira externa do presente projeto de extensão e pesquisa recebeu um método de separação dos materiais componentes dos MF com vistas a mitigar uma situação problema enfrentada pela empresa a respeito do destino dos MF obsoletos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Pró-Reitora de Extensão do IFSC pelo apoio financeiro ao projeto. Agradecemos também a empresa LEnergy Energia Solar pela parceria e confiança no trabalho realizado.

REFERÊNCIAS

DURSUN, D.; YILMAZ, O.; EVCIN, A. *Crosslinked EVA encapsulant material in photovoltaic modules: structure, properties and degradation*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 109, p. 558–568, 2019.

LUO, R.; MIAO, J.; ZHAO, Y. *The swelling mechanism of ethylene-vinyl acetate polymer in different solvents via molecular dynamics and experimental studies*. **Soft Matter**, v. 21, p. 699-727, 2025.

MIRANDA, Rosana Teixeira. **Análise da gestão de fim de vida de módulos fotovoltaicos, utilizando o estudo de Análise de Ciclo de Vida (AVC) para comparar os impactos de duas estratégias de gestão de fim de vida.** 2019. 122f. Dissertação (Mestrado). PPGE, UNIFEI, Itajubá, 2019.

APLICAÇÃO DE MATERIAIS FOTOCATALÍTICOS NO TRATAMENTO DE CONTAMINANTES EMERGENTES EM ÁGUA

Henrico Junior Schossler¹, Carlos Rafael Silva de Oliveira², Carla de Abreu D'Aquino³, Luiz Fernando Belchior Ribeiro³, Afonso Henrique da Silva Júnior³

¹ Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)/Graduando em Engenharia de Energia

² Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)/Programa de Pós-Graduação em Nanociência, Processos e Materiais Avançados (PPGNPMat)

³ Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)/Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGES)

Resumo: A presença de contaminantes emergentes em corpos hídricos, como fármacos, corantes, pesticidas e microplásticos, tem se consolidado como um dos maiores desafios ambientais da atualidade, devido à sua elevada persistência, toxicidade e baixa biodegradabilidade. Diante das limitações dos processos convencionais de tratamento, este trabalho teve como objetivo revisar e analisar os avanços recentes na aplicação de materiais fotocatalíticos no tratamento de efluentes aquosos contaminados por esses poluentes, destacando as principais heteroestruturas semicondutoras e seus mecanismos de degradação. Para isso, foi conduzida uma pesquisa bibliográfica exploratória em bases de dados reconhecidas (ScienceDirect, Scopus, Web of Science e Google Scholar), considerando publicações entre 2020 e 2025. Foram selecionados estudos que relataram o uso de catalisadores à base de ferro, bismuto, molibdênio e carbono, aplicados à degradação de compostos orgânicos de alta recalcitrância. Os resultados compilados evidenciam eficiências superiores a 95% de remoção em tempos reduzidos, com destaque para as heteroestruturas $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Bi}_2\text{O}_3$ e $\text{Bi}_2\text{MoO}_6/\text{BiOBr}$, que atingiram degradações completas de antibióticos e corantes sob luz visível, mantendo estabilidade estrutural após múltiplos ciclos de reuso. Observou-se ainda que a formação de junções em esquema Z ou S favorece a separação eficiente de pares elétron-lacuna e amplia a geração de espécies oxidantes ativas ($\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{SO}_4^-$ e $^1\text{O}_2$). Conclui-se que a fotocatalise heterogênea representa uma rota tecnológica sustentável e de baixo custo para a remediação de águas contaminadas, embora a maioria dos estudos ainda se concentre em condições laboratoriais, indicando a necessidade de ensaios em efluentes reais e de avaliações de durabilidade e viabilidade econômica para aplicação em escala industrial.

Palavras-chave: Fotocatalise Heterogênea, Poluentes Emergentes, Processos Oxidativos Avançados, Heteroestruturas Semicondutoras, Tratamento de Efluentes.

1 INTRODUÇÃO

A contaminação dos recursos hídricos por compostos orgânicos e inorgânicos tem se intensificado em função das atividades industriais, agrícolas e urbanas, resultando na presença de metais pesados, pesticidas, corantes, fármacos e microplásticos em águas superficiais e subterrâneas (TAN; YUEN; RAMLI, 2025). Muitos desses poluentes, classificados como contaminantes emergentes, apresentam alta persistência, toxicidade e baixa biodegradabilidade, o que compromete a eficiência dos processos convencionais de tratamento e acarreta riscos à biodiversidade aquática e à saúde humana (ULLAH *et al.*, 2025).

As estações de tratamento de água tradicionais não foram projetadas para remover com eficácia os contaminantes emergentes, como fármacos, corantes e microplásticos, os quais têm sido detectados em diferentes ecossistemas aquáticos, mesmo em baixas concentrações (ZHANG *et al.*, 2025a). Essa realidade evidencia riscos significativos para organismos aquáticos e para a saúde pública.

Nesse contexto, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) despontam como alternativa promissora, baseados na geração de espécies altamente reativas, como radicais hidroxila, ozônio e peróxido de hidrogênio, capazes de degradar compostos orgânicos e inorgânicos de forma não seletiva (SHUKLA; CHAUHAN; VAISH, 2025). Entre essas tecnologias, a fotocatalise heterogênea se destaca por utilizar energia luminosa, natural ou artificial, para promover a excitação eletrônica em semicondutores, resultando na formação de radicais oxidantes que interagem com os contaminantes presentes na água. Estudos recentes buscam aumentar a eficiência desses fotocatalisadores, especialmente por meio do controle da separação de elétrons e lacunas, reforçando o potencial dessa rota como alternativa sustentável e de baixo custo, com aproveitamento da energia solar (ZHANG *et al.*, 2025b).

Diante disso, este trabalho de revisão discute a aplicação da fotocatalise heterogênea como tecnologia para a degradação de contaminantes emergentes, com ênfase em catalisadores empregados e perspectivas para uso em escala prática.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido por meio de uma pesquisa bibliográfica de caráter exploratório e descritivo, com foco em artigos científicos publicados nos últimos cinco anos sobre o uso de materiais fotocatalíticos aplicados à degradação de contaminantes emergentes em água.

A coleta de informações foi realizada em bases de dados internacionais reconhecidas pela comunidade científica, incluindo *ScienceDirect*, *Scopus*, *Web of Science* e *Google Scholar*. Foram utilizados descritores em inglês e português, de forma isolada e combinada, tais como: *photocatalysis*, *heterogeneous catalysis*, *advanced oxidation processes*, *perovskite catalysts*, *iron-based catalysts*, *emerging contaminants* e *wastewater treatment*.

O período de busca concentrou-se entre 2020 e 2025, de modo a contemplar os avanços mais recentes da área, com prioridade para estudos que reportassem a eficiência de degradação de fármacos, corantes e microplásticos. Foram incluídos artigos originais e revisões, priorizando trabalhos que apresentassem dados quantitativos de desempenho catalítico, processo aplicado e perspectivas de aplicação em escala prática.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Efeitos dos Contaminantes Emergentes Sobre o Meio Ambiente e a Saúde

A poluição causada por contaminantes emergentes decorre, em grande parte, do escoamento superficial e da lixiviação, que transportam poluentes presentes no solo para rios, lagos, oceanos e até lençóis freáticos (LI *et al.*, 2025a). Esse processo ocorre tanto em áreas rurais, marcadas pelo uso intensivo de pesticidas, quanto em regiões urbanas, onde sistemas de drenagem levam efluentes para corpos hídricos, comprometendo ecossistemas aquáticos e o equilíbrio natural das espécies (AI *et al.*, 2025).

Os pesticidas, herbicidas, fungicidas e inseticidas, são amplamente empregados na agricultura para suprir a demanda alimentar global, mas também são utilizados em ambientes urbanos, como gramados, parques e áreas verdes (ULLAH *et al.*, 2025). Além deles, fármacos, cosméticos e microplásticos alcançam os ambientes aquáticos e terrestres principalmente por atividades antropogênicas (LI *et al.*, 2025a).

A descarga de efluentes hospitalares e farmacêuticos é especialmente preocupante, pois pode causar efeitos toxicológicos em organismos aquáticos, induzir estresse oxidativo e alterar a fisiologia animal, afetando comportamento e reprodução. Assim, a presença de contaminantes emergentes representa um risco significativo à biodiversidade e à saúde ambiental (ZHANG *et al.*, 2025a).

3.2 Aplicações de Materiais no Tratamento de Efluentes Aquosos

A busca por soluções sustentáveis para o tratamento de águas contaminadas tem impulsionado o estudo de heteroestruturas fotocatalíticas, que vêm demonstrando desempenho superior e aplicabilidade promissora em condições reais de operação. He *et al.* (2025) sintetizaram uma heterojunção $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Bi}_2\text{O}_3$ *p-n*, avaliada para a remoção do antibiótico tetraciclina. O sistema combinado de fotocatalise e ativação de peroximonossulfato sob luz visível alcançou 100% de degradação em 80 minutos, com constante cinética 34,5 vezes superior à da fotocatalise isolada. O mecanismo proposto evidenciou a geração sinérgica de espécies reativas, incluindo $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{SO}_4^-$ e $^1\text{O}_2$, além da eficiente separação de pares elétron-lacuna, o que garantiu elevada estabilidade do catalisador após múltiplos ciclos.

Em outro estudo, Ai *et al.* (2025) desenvolveram uma heteroestrutura em esquema-S composta por $\text{Bi}_2\text{MoO}_6/\text{BiOBr}$, aplicada à remoção de corantes e antibióticos em meio aquoso. O material apresentou desempenho expressivo, atingindo 99,6% de degradação do azul de metileno, 98,1% de tetraciclina e 86,3% de rodamina em apenas 30 minutos sob irradiação visível. A elevada eficiência foi atribuída à formação de heterojunções estáveis, que favoreceram a transferência de carga e a geração de radicais

oxidativos. Além disso, os testes de reuso confirmaram a estabilidade estrutural e a reprodutibilidade do desempenho catalítico ao longo de vários ciclos.

Esses trabalhos demonstram o potencial das heteroestruturas à base de bismuto e ferro como alternativas sustentáveis e eficientes para o tratamento de águas contaminadas, ampliando as perspectivas de aplicação em sistemas de remediação ambiental em escala real. Na Tabela 1 são mostrados outros trabalhos recentes que exploraram diferentes materiais catalíticos aplicados à remediação de efluentes contaminados por poluentes emergentes.

Tabela 01 – Materiais catalíticos aplicados no tratamento de efluentes.

Material	Poluente	Remoção (%)	Referência
Óxido de Grafeno/Biochar	Corantes Têxteis e Cromo	74-95	(ULLAH <i>et al.</i> , 2025)
MoS ₂ /MIL-101(Fe)/Filtro de Fibras de Carbono	Tetraciclina	98,08	(ZHANG <i>et al.</i> , 2025a)
Bi _{0.5} Na _{0.5} /TiO ₃ -BaTiO ₃	Azul de Metileno e Rodamina	11-78	(SHUKLA; CHAUHAN; VAISH, 2025)
Bi ₂ O ₃ /Cu ₂ ZnSnS ₄ /Esferas de Gel	Rodamina	100	(LI <i>et al.</i> , 2025a)
Polieterimida/Bi ₂ MoO ₆	Azul de Metileno e Laranja Metila	97,2 e 93	(ZHANG <i>et al.</i> , 2025b)
Bi ₂ MoO ₆ /BiOBr	Azul de Metileno, Tetraciclina e Rodamina	99,6, 98,1 e 86,3	(Al <i>et al.</i> , 2025)
Nitreto de Carbono/Cianamida/Boro	Cromo	99,9	(LI <i>et al.</i> , 2025b)

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão evidencia que os materiais fotocatalíticos apresentam resultados expressivos na remoção de contaminantes emergentes, alcançando elevadas taxas de degradação em curtos períodos e mantendo estabilidade após diversos ciclos de uso. Esses avanços reforçam o potencial da fotocatalise heterogênea como tecnologia sustentável e de baixo custo para o tratamento de águas contaminadas. Contudo, os estudos ainda se concentram majoritariamente em condições laboratoriais, o que destaca a necessidade de investigações em efluentes reais, avaliações de durabilidade em longo prazo e análises de viabilidade técnica e econômica para consolidar sua aplicação em escala industrial.

REFERÊNCIAS

Al, L. *et al.* S-scheme Bi₂MoO₆/BiOBr heterostructure for effective removal of dye: Synergistic mechanism insight of adsorption-photocatalysis. **Environmental Research**, v. 275, n. February, p. 121301, jun. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121301>>.

HE, Y. *et al.* Synergistic activation of photocatalysis and peroxymonosulfate via Fe₂O₃/Bi₂O₃ p-n heterojunction for enhanced degradation of tetracycline. **Chemical Physics Letters**, v. 876, n. April, p. 142301, out. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cplett.2025.142301>>.

LI, H. *et al.* Facile construction of 2D/2D δ -Bi₂O₃/Cu₂ZnSnS₄ heterojunction with the immobilization on gel beads for the photocatalysis. **Applied Surface Science**, v. 710, n. June, p. 163962, nov. 2025a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.163962>>.

LI, K. *et al.* Synergistic enhanced dark photocatalysis of *g*-C₃N₄ with cyanamide-modification and boron doping for efficient Cr(VI) reduction by mimicking photosynthesis. **Applied Surface Science**, v. 714, n. August, p. 164495, dez. 2025b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.164495>>.

SHUKLA, A.; CHAUHAN, V. S.; VAISH, R. Effect of poling in solar/visible light photocatalysis for binary dye degradation using 0.937(Bi_{0.5}Na_{0.5})TiO₃–0.063BaTiO₃. **FlatChem**, v. 53, n. August, p. 100926, set. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.flatc.2025.100926>>.

TAN, S. N.; YUEN, M. L.; RAMLI, R. A. Photocatalysis of dyes: Operational parameters, mechanisms, and degradation pathway. **Green Analytical Chemistry**, v. 12, n. February, p. 100230, mar. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.greeac.2025.100230>>.

ULLAH, A. *et al.* Biochar and GO doped biochar powder for photocatalysis, adsorption, and latent fingerprint detection. **Journal of Water Process Engineering**, v. 78, n. June, p. 108794, out. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108794>>.

ZHANG, L. *et al.* Boosting tetracycline photocatalysis: Fenton-like synergy amplifies performance in Z-schemed MoS₂/MIL-101(Fe) heterojunction grown on soft carbon fibers felt. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 1038, n. August, p. 182909, ago. 2025a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.182909>>.

ZHANG, W. *et al.* Preparation of polyetherimide/Bi₂MoO₆ composite membrane by electrospinning and hydrothermal method for rapid photocatalysis and its degradation mechanism. **Journal of Water Process Engineering**, v. 78, n. August, p. 108681, out. 2025b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108681>>.

RESÍDUOS AGRÍCOLAS COMO PRECURSORES PARA ADSORVENTES E SUPORTES CATALÍTICOS APLICADOS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES

Vitor Casarin Fernandes¹, Henrico Junior Schossler¹, Carlos Rafael Silva de Oliveira², Leandro Pellenz³, Carla de Abreu D'Aquino⁴, Natália Ueda Yamaguchi⁴, Luiz Fernando Belchior Ribeiro⁴, Afonso Henrique da Silva Júnior⁴

¹ Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)/Graduando em Engenharia de Energia

² Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)/Programa de Pós-Graduação em Nanociência, Processos e Materiais Avançados (PPGNPMat)

³ Instituto Federal de Brasília (IFB)

⁴ Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)/Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGES)

Resumo: Este trabalho apresenta uma visão geral sobre o aproveitamento de resíduos agrícolas como precursores para a produção de adsorventes e suportes catalíticos aplicados ao tratamento de águas contaminadas. O objetivo principal foi identificar os avanços recentes na utilização de biomassa residual, como palha de trigo, casca de arroz, bagaço de oliva, casca de café e outros subprodutos agroindustriais, na obtenção de materiais funcionais com potencial para remover poluentes emergentes, metais pesados, corantes e fármacos presentes em efluentes. A metodologia consistiu em pesquisa bibliográfica exploratória em bases de dados reconhecidas, selecionando alguns artigos publicados nos últimos cinco anos que relataram síntese, caracterização e aplicação de tais materiais em processos de adsorção e catálise heterogênea. A análise destacou que a maioria dos estudos reporta altas capacidades adsorptivas e percentuais de remoção superiores a 90%. Foram observadas vantagens como abundância e baixo custo dos precursores, além da possibilidade de integrar soluções sustentáveis à economia circular. No entanto, persistem desafios relacionados à variabilidade composicional dos resíduos, à escalabilidade dos processos de síntese e à necessidade de validar a eficiência em efluentes reais, que apresentam misturas complexas de contaminantes. Os resultados apontam que a combinação de adsorção e catálise em um mesmo material representa uma tendência promissora, ampliando a eficiência global do tratamento e reduzindo custos de regeneração. Conclui-se que os resíduos agrícolas apresentam grande potencial como plataforma para o desenvolvimento de materiais multifuncionais e sustentáveis, alinhados às demandas ambientais atuais e aos objetivos de desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Biomassa Agrícola, Adsorção, Catálise Heterogênea, Economia Circular.

1 INTRODUÇÃO

A contaminação dos recursos hídricos por compostos orgânicos e inorgânicos tem se intensificado devido às atividades industriais, urbanas e agrícolas, resultando na presença de corantes, pesticidas, fármacos, hormônios e metais pesados em águas superficiais e subterrâneas (LAI *et al.*, 2019). Muitos desses contaminantes, classificados como poluentes emergentes, apresentam alta persistência, toxicidade e baixa biodegradabilidade, o que compromete a eficiência dos processos convencionais de tratamento. Essa realidade ameaça tanto a biodiversidade aquática quanto a saúde pública, configurando um desafio global que demanda soluções inovadoras e sustentáveis em consonância com o ODS 6 (OSPINA-MONTOYA *et al.*, 2025).

Entre as alternativas promissoras, destaca-se a valorização de resíduos agrícolas como fonte para a produção de adsorventes e suportes catalíticos aplicados na remediação ambiental (GARBA; RATANATAMSKUL, 2025). Subprodutos como casca de arroz, bagaço de cana, palha de milho e fibras de banana podem ser convertidos, por meio

de pirólise, ativação física ou química, em materiais carbonosos com elevada área superficial e funcionalização ajustável. Esses materiais têm demonstrado eficiência na remoção de corantes, íons metálicos e compostos recalcitrantes, além de possibilitarem a integração entre adsorção e catálise heterogênea (ZHANG *et al.*, 2023). Assim, a utilização de resíduos agrícolas representa uma estratégia de economia circular, aliando mitigação da poluição hídrica, valorização de passivos agroindustriais e viabilidade técnica e econômica para o tratamento de águas contaminadas. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é discutir o potencial dos resíduos agrícolas como matéria-prima para a produção de adsorventes e suportes catalíticos, com ênfase em suas aplicações no tratamento de água e nos desafios para sua utilização em escala industrial.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido por meio de uma pesquisa bibliográfica de caráter exploratório e descritivo, com foco em artigos científicos publicados nos últimos cinco anos sobre o aproveitamento de resíduos agrícolas para a produção de adsorventes e suportes catalíticos aplicados ao tratamento de águas contaminadas.

A coleta de informações foi realizada em bases de dados internacionais reconhecidas pela comunidade científica, incluindo *ScienceDirect*, *Scopus*, *Web of Science* e *Google Scholar*. Foram usados descritores em inglês e português, de forma isolada e combinada, como: *agricultural waste*, *biochar*, *activated carbon*, *adsorbent*, *catalyst support* e *wastewater treatment*. O período de busca concentrou-se entre 2020 e 2025, visando contemplar avanços recentes na área.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Produção de Adsorventes e Suportes Catalíticos

A produção de adsorventes e suportes catalíticos a partir de resíduos agrícolas envolve a conversão térmica da biomassa em biochar, obtido por carbonização entre 300 e 800 °C em atmosfera inerte, cujas propriedades estruturais variam conforme a temperatura aplicada: em condições mais baixas, predominam grupos oxigenados que favorecem a interação química, enquanto em temperaturas elevadas há maior microporosidade e estabilidade (WELTER *et al.*, 2022). Para ampliar o desempenho, o biochar pode ser submetido à ativação física ou química, que geram materiais altamente porosos, ajustáveis ao tipo de contaminante (NING *et al.*, 2024). Modificações adicionais,

como funcionalização com grupos carboxílicos, hidroxilas ou aminas, aumentam a seletividade e a afinidade por diferentes poluentes, enquanto a impregnação com metais de transição confere atividade catalítica para processos oxidativos avançados (ALAWA *et al.*, 2025). Nesse contexto, a integração entre adsorção e catálise torna-se estratégica, permitindo que o material concentre os contaminantes e promova sua degradação, combinando eficiência, durabilidade e viabilidade industrial.

3.2 Aplicações no Tratamento de Água Contaminada

A literatura recente mostra avanços significativos no desenvolvimento de adsorventes e suportes catalíticos derivados de resíduos agrícolas, com desempenho relevante na remoção de diferentes contaminantes. Garba e Ratanatamskul (2025) desenvolveram um novo adsorvente a partir de *Hamelia patens* Jacq., aplicando-o à remoção de poluentes fenólicos. Os experimentos em batelada investigaram o efeito de parâmetros como pH, temperatura, tempo de contato e concentração inicial dos contaminantes, revelando capacidades adsorptivas de 273,25 mg·g⁻¹ para 2,4,6-triclorofenol e 232,47 mg·g⁻¹ para 2,4-diclorofenol. A análise de equilíbrio demonstrou que o modelo de Langmuir foi o que melhor descreveu os dados, enquanto a cinética foi ajustada ao modelo de pseudo-segunda ordem. Além disso, estudos de regeneração comprovaram a estabilidade do material, que manteve elevada eficiência por até cinco ciclos consecutivos.

Ospina-Montoya *et al.* (2025) propuseram a utilização de casca de café para a síntese de compósitos bifuncionais de ZnO/*biochar* preparados por rota hidrotérmica. Os materiais foram aplicados na remoção de cafeína, contaminante emergente amplamente encontrado em ambientes aquáticos. O compósito contendo 40,6% em massa de carvão, apresentou desempenho superior, alcançando remoção de até 96,5% em soluções de 5 mg·L⁻¹ e 80% em 10 mg·L⁻¹ sob condições escuras, via adsorção. Sob iluminação, a presença de ZnO promoveu a geração de espécies reativas de oxigênio, que degradaram a cafeína em subprodutos hidroxilados. A combinação de adsorção e fotocatálise resultou em remoção completa em diferentes condições, e os compósitos mantiveram estabilidade estrutural e eficiência após múltiplos ciclos de uso, confirmando seu potencial como materiais sustentáveis e multifuncionais para o tratamento de águas contaminadas. Na Tabela 1 mostra alguns trabalhos reportados na literatura que utilizaram precursores agrícolas na produção de adsorventes ou suportes catalíticos e aplicaram no tratamento de águas contaminadas.

Tabela 01 – Adsorventes e suportes catalíticos obtidos de resíduos agroindustriais aplicados no tratamento de águas contaminadas.

Precursor	Poluente	q_{MAX} (mg·g ⁻¹)	Processo	Remoção (%)	Referência
Palha de Trigo	Ciprofloxacina	14,51	Adsorção	90-98	(ALAWA <i>et al.</i> , 2025)
Azeitona	Sulfametoxazol	39,68	Adsorção	–	(METYOUY <i>et al.</i> , 2024)
Casca de Arroz/Ferro	Chumbo e Cobre	31,7 e 17,3	Adsorção	–	(GARGIULO; DI NATALE; ALFE, 2024)
Casca de Arroz/Fe ₃ O ₄	Paraquat	75,64	Adsorção	–	(PHOUTHAVONG <i>et al.</i> , 2023)
Pólen de Pinus/CoFe ₂ O ₄ /Ag ₃ PO ₄	Bisfenol-A	–	Fotocatálise	91,12	(ZHAI <i>et al.</i> , 2020)
Casca de Coco/FeVO ₄	Ofloxacina	–	Fotocatálise	95,2	(NING <i>et al.</i> , 2024)
Resíduo de Papel/TiO ₂	Sulfadiazina e Oxolínico	–	Fotocatálise	25-90	(SILVA <i>et al.</i> , 2021)
Junco/Fe ₂ O ₃	Clorofenol	–	Fotocatálise	96,41	(ZHANG <i>et al.</i> , 2023)
Quitina/ZnFe ₂ O ₄	Rodamina B	–	Fotocatálise	100	(WELTER <i>et al.</i> , 2022)

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão evidencia que resíduos agrícolas constituem uma fonte abundante e versátil para a produção de adsorventes e suportes catalíticos aplicados ao tratamento de águas contaminadas, apresentando desempenhos expressivos na remoção de poluentes emergentes, muitas vezes comparáveis ou superiores aos de materiais convencionais, além de possibilitar integração com processos fotocatalíticos e oxidativos. Contudo, a maior parte dos avanços ainda se restringe a condições laboratoriais, o que demanda estudos em efluentes reais, padronização de rotas de síntese, testes de estabilidade em múltiplos ciclos e análises de ciclo de vida para consolidação da tecnologia.

REFERÊNCIAS

ALAWA, B. *et al.* Development of novel biochar adsorbent using agricultural waste biomass for enhanced removal of ciprofloxacin from water: Insights into the isotherm, kinetics, and thermodynamic analysis. **Chemosphere**, v. 375, n. January, p. 144252, abr. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144252>>.

GARBA, Z. N.; RATANATAMSKUL, C. Kinetics, adsorption mechanism, and economic viability of an eco-friendly amorphous carbon thin-film adsorbent synthesized from agricultural waste for removal of 2,4-dichlorophenol and 2,4,6-trichlorophenol in water

environment. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 12, n. July, p. 101268, dez. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101268>>.

GARGIULO, V.; DI NATALE, F.; ALFE, M. From agricultural wastes to advanced materials for environmental applications: Rice husk-derived adsorbents for heavy metals removal from wastewater. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 5, p. 113497, out. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113497>>.

LAI, C. *et al.* Fabrication of novel magnetic MnFe_2O_4 /biochar composite and heterogeneous photo-Fenton degradation of tetracycline in near neutral pH. **Chemosphere**, v. 224, p. 910–921, jun. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.193>>.

METYOUY, K. *et al.* Valorization of agricultural olive waste as an activated carbon adsorbent for the remediation of water sources contaminated with pharmaceuticals. **Sustainable Chemistry for the Environment**, v. 6, n. May, p. 100110, jun. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100110>>.

NING, C. *et al.* Enhanced degradation of ofloxacin by activation of peroxymonosulfate with biochar- FeVO_4 under visible light assistance: The role of biochar in mediating charge transfer and mechanism insight. **Applied Surface Science**, v. 652, n. November 2023, p. 159236, abr. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.159236>>.

OSPINA-MONTOYA, V. *et al.* Synergistic adsorption and photocatalysis using coffee husk-derived ZnO /hydrochar for efficient caffeine removal. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 13, n. 5, p. 118306, out. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118306>>.

PHOUTHAVONG, V. *et al.* Utilization of agricultural waste to herbicide removal: Magnetic BEA zeolite adsorbents prepared by dry-gel conversion using rice husk ash-derived SiO_2 for paraquat removal. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 16, n. 8, p. 104959, ago. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104959>>.

SILVA, C. P. *et al.* Biochar- TiO_2 magnetic nanocomposites for photocatalytic solar-driven removal of antibiotics from aquaculture effluents. **Journal of Environmental Management**, v. 294, n. April, p. 112937, set. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112937>>.

WELTER, N. *et al.* Preparation of a new green composite based on chitin biochar and ZnFe_2O_4 for photo-Fenton degradation of Rhodamine B. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 901, p. 163758, abr. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.163758>>.

ZHAI, Y. *et al.* Novel biochar@ $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ photocatalysts for highly efficient degradation of bisphenol a under visible-light irradiation. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 560, p. 111–121, fev. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.08.065>>.

ZHANG, C. *et al.* Enhanced visible light assisted peroxymonosulfate process by biochar in-situ enriched with $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ for p-chlorophenol degradation: performance, mechanism and DFT calculation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 445, n. July 2022, p. 130593, mar. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130593>>.

**O PENSAMENTO ECONÔMICOS ECOLÓGICO CONTEMPORÂNEO E SUAS CONEXÕES
COM O MÉTODO EMERGIA: UMA FERRAMENTA PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL
DE RECURSOS HÍDRICOS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS
PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ (PCJ)**

Julio Cesar Lopes Borges¹, Carla de Abreu D'Aquino², Oldemar Carvalho Júnior³

¹ Universidade Federal de Santa Catarina / jlopesborges@yahoo.com.br

² Universidade Federal de Santa Catarina / carla.daquino@ufsc.br

³ Instituto Ekko Brasil / ocjunior@ekkoBrasil.org.br

Resumo: A partir da segunda metade do século XX, desenvolveu-se um grande debate sobre os limites da natureza. Nos encontros entre nações, destacam-se a Conferência de Estocolmo (1972), Rio-92 (1992), Cúpula do Milênio (2000), Cimeira Mundial de Joanesburgo (2002), Conferências das partes COP'S, entre outras, que produziram novos olhares e paradigmas. A emergência de alocar as questões do ambiente nas diversas ciências se fizeram necessário, tendo em vista que os países desenvolvidos e subdesenvolvidos apresentam desafios importantes. A economia ecológica, é parte integrante dos desafios iniciados neste período, tendo em vista as necessidades de dar respostas às questões do clima. O objetivo de conectar a economia ecológica com o método de valoração ambiental (Emergia) é orientar estudos sobre suas atividades econômicas, neste caso as bacias hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari, Jundiaí (PCJ), que captam os fluxos energéticos e produzem resultados e informações, necessárias para tomada de decisão. Mais que um estudo teórico, a conexão entre economia ecológica e o método científico proposto, é absorver dados sobre a realidade, buscando novas estratégias ambientais. Resulta assim, a concretização de uma base heterodoxa para uma análise econômico ecológica utilizando dados físicos e matemáticos, que podem mapear realidades e propor sistemas mais eficientes de sustentabilidade.

Palavras-chave: Economia Ecológica; Emergia; Bacias PCJ

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento histórico do pensamento econômico está ligado às transformações socioeconômicas de cada período. Cada transformação social desencadeou, a partir da materialidade, a transformação do pensar econômico. Sempre a partir do mais desenvolvido é sempre uma análise do passado mais complexo. Neste sentido, a economia ecológica é a evolução dos conceitos de economia ao longo dos tempos, em contraposição, neste momento, ao da economia ambiental neoclássica.

Para tanto, o método emergético é desenvolvido nas possibilidades da economia ecológica, pois se apresenta como heterodoxa, e vai no sentido de contribuir para uma análise da realidade do ambiente, uma resposta às questões de sustentabilidade forte.

Tendo em vista a evolução do pensamento econômico, que está intimamente ligado às realizações e investidas humanas até aqui. A economia ambiental proporcionou uma visão engessada sobre a realidade ecológica e física. Neste sentido, a economia ecológica juntamente com o método emergético pode contribuir para o mapeamento das bacias hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari, Jundiaí (Bacias PCJ), servindo como ponto de partida.

Segundo Carvalho-Junior et al (2024) a avaliação ecológica do metabolismo de energia e materiais possui importância significativa na análise da extensão da apropriação humana de energia e recursos, assim como na determinação do estado ecológico do sistema. Dessa forma, o presente trabalho procurou discutir a temática levando em conta seus aspectos ecológicos e físicos dentro do contexto da biosfera. E promove, desta forma, balizas para uma sustentabilidade forte utilizando o método emergia e fomentar a pesquisa a partir das Bacias PCJ.

2 METODOLOGIA

O objetivo foi analisar a conexão entre o pensamento econômico ecológico contemporâneo e o método emergia, destacando sua aplicabilidade em contextos de gestão hídrica e sustentabilidade. O trabalho se refere a um estudo bibliográfico levando em consideração as palavras chaves: “Economia Ecológica”; “Emergia”; “Bacias PCJ”. A base de dados utilizada foi o google acadêmico identificando os primeiros 10 artigos pelos resumos, e observando sua relação com a temática proposta.

Análise de artigos científicos selecionados foi organizada nas seguintes etapas:

1) Identificar artigos que façam a conexão entre economia ecológica e emergia; 2) De qual forma estabelece essa conexão; 3) Como utilizar o método emergia partindo dos conceitos de economia ecológica; 4) Verificar o contexto das Bacias PCJ e sua importância para estudos futuros em emergia.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os artigos estão sumariados no Quadro 1. O estudo evidencia que a corrente econômica mais apropriada para a aplicação do método de emergia é a economia ecológica. Considerando a análise dos fluxos energéticos. Os estudos pesquisados demonstram que a economia ecológica está necessariamente conectada à sustentabilidade forte e desenvolvendo estudos a partir do método emergético. Desta forma, a pesquisa observou que há poucos trabalhos que façam a conexão entre as bases da economia ecológica, o método emergético, aplicados na área das bacias PCJ. Assim carece desta análise com foco nos fluxos energéticos.

Quadro 1. Apresenta o sumario dos artigos considerando a forma de conexão, o método e a Bacia PCJ.

Autor/Ano	Título	De qual forma estabelece essa conexão?	Como utilizar o método emergético partindo do conceito de economia ecológica?	Contextos da bacia PCJ
Carvalho-Junior, et al (2024)	Application of emergy accounting techniques to the sustainability of the Araranguá River estuary.	Avalia e descreve os fluxos energéticos do sistema estuarino do Rio Araranguá - Santa Catarina	Não especifica a abordagem econômica ecológica, mas utiliza o método emergético.	Não trabalha com a bacia PCJ mas sim com o Rio Araranguá.
DE ASSIS, et al. (2020)	As mudanças do clima e os desafios da gestão dos recursos hídricos nas Bacias do PCJ: evidências discursivas da ascensão de um novo paradigma.	Não faz conexão da economia ecológica com o método de emergia. Consistem na análise da frequência simples e verificação das formas ativas mais frequentes do corpus, mediante o emprego dos recursos informacionais do software TextSTAT	Não estabelece ligação nem com a economia ecológica nem com o método emergético.	Destaca que, em razão da redução da oferta hídrica no âmbito das Bacias PCJ, ocorreram mudanças de foco no planejamento das ações e da gestão dos recursos hídricos, indo das tecnologias "cinza" para as tecnologias "verdes", na tentativa de amenizar os efeitos da redução da oferta hídrica.
DE FREITAS, Carlos Eduardo Dias et al. (2021)	O instrumento de outorga e os limites ambientais: uma investigação sob a perspectiva da Economia Ecológica.	Não desenvolve o método emergético. Avalia se há aderência dos critérios de concessão de outorga de direito de uso da água aos limites ambientais previstos pela economia ecológica.	Estabelece ligação nem com a economia ecológica, mas não com o método emergético.	A PCJ apresenta uma degradação dos recursos hídricos e o aumento da demanda têm desafiado a efetividade de governança
FREITAS, Carlos Eduardo Dias de. (2019)	O instrumento de outorga e os limites ambientais para a exploração da água nas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá: uma investigação à luz da Economia Ecológica.	Desenvolve-se na disputa entre economia ambiental e economia ecológica para análise da utilização da água, não trabalhando o método emergético.	Não aborda o método emergético mas parte da economia ecológica. Desta forma não utiliza o método emergético mas sim outros métodos da economia ecológica heterodoxa.	Aponta para a futura escassez da água na PCJ e como lidar com o uso da água. Utilizando indicadores para analisar o nível de uso da água.
JULIÃO, Nilton Lucio. (2024)	Gestão sustentável de recursos hídricos: proposta de uma matriz de avaliação dos indicadores de sustentabilidade das ações propostas no Plano de Bacias 2020/2035 dos Comitês das Bacias PCJ.	Não estabelece conexão com o método emergético nem com a economia ecológica	Não utiliza.	Estudo foca em selecionar ações de maior prioridade do Plano de Bacias PCJ 2020 a 2035, com base nas dimensões ambiental, econômica e social da sustentabilidade.
MENDES, Jakeline Pertile. (2022)	Indicadores de sustentabilidade para gestão da segurança hídrica nas bacias hidrográficas PCJ: estudos de caso das sub-bacias dos Rios Atibaia e Piracicaba.	Não se conecta com as bases da economia ecológica nem com o método de emergia. Utilizou-se a Análise Fatorial por Componentes Principais para elaboração de um Índice de Segurança Hídrica.	Não utiliza	Com o crescimento da urbanização ao redor da PCJ, a gestão das águas e seu uso precisam ser avaliados
ORELLANA GONZALEZ, Alba	Modelo de simulação dinâmica para valoração ecológica de serviços	Desenvolve valoração econômica e serviços ecossistêmicos de análise, mas não	Não utiliza	Há uma preocupação na qualidade da água na PCJ, que pode alterar o abastecimento

Maria Guadalupe. (2010)	ecossistêmicos hídricos nas bacias PCJ.	especifica partindo da economia ecológica, mas construção de diagramas, de estoque e fluxos.		e oferta de água na região.
PATRIANI, Tainá Yumi. (2024)	A mitigação local de mudanças climáticas: discurso e atuação de vereadores nas bacias PCJ.	Não se apropria nem da economia ecológica nem do método de emerggia, mas uma pesquisa de análise do discurso com pesquisa qualitativa.	Não utiliza	A PCJ é o ponto a ser estudado em relação às mudanças climáticas. Faz-se necessário obter informações sobre o discurso dos vereadores em relação a PCJ e as mudanças do clima.
PETRINI, Bruna Eveline Domingos. (2024)	Propostas de mecanismos de cobrança pelo uso da água no setor rural nas Bacias PCJ, visando o incentivo à adequação ambiental e recomposição florestal.	Não estabelece conexão com a economia ecológica nem com o método emergético. Mas propõe modelos matemáticos para análise no sentido da cobrança pelo uso da água e da área ecológica.	Não utiliza	O setor rural utiliza a PCJ para a produção. Avaliar a distribuição desse recurso se faz necessário para a posterior cobrança.
PUGA, et al (2020)	Governança dos recursos hídricos na bacia do rio Jundiá (São Paulo): desafios para uma governança integrada e adaptativa.	Não trabalha a economia ecológica nem o método emergético. Desenvolve estudo sobre governança e aspectos institucionais a partir de documentos oficiais.	Não trata	As mudanças climáticas têm desencadeado processos e análises sobre a bacia do Rio Jundiá. Desenvolver governanças sobre as bacias de faz necessário diante dos problemas climáticos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de emerggia, iniciado por ODUM tem o intuito de valoração utilizando conceitos econômicos, ecológicos, matemáticos e físicos. A economia ecológica pode ser o ponto de partida para as investidas ao método de emerggia e proporcionar uma análise e mapeamento da realidade utilizando suas conexões. Os cálculos e os indicadores, levando em consideração a energia solar, estabelece um vínculo na relação entre homem e natureza. Deste modo temos os processos físicos e ecológicos, a interconexão da biosfera, processos sociais e trocas de energia e econômicas.

Os recursos hídricos têm sido ponto de debate em seu uso, tanto pela iniciativa privada como pelo poder público. Conforme observado nesse trabalho, a utilização de métodos complexos e completos como método emergético, para mapear as possibilidades e potencialidades de sustentabilidade praticamente não é utilizado. Considerando a complexidade das Bacias PCJ sugere-se que em estudos futuros se faça uso dessa ferramenta com uma discussão voltada para a economia ecológica.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro da FAPESC, na forma de bolsa. Ao auxílio do Laboratório de Energias Renováveis e Aceitação Social - LABeras. E ao programa de pós-graduação em Energia e Sustentabilidade - PPGES, da Universidade Federal de Santa Catarina.

REFERÊNCIAS

Carvalho-Junior, O.O, D'Aquino, C. A., Amine, A., Junior, S., & Birolo, A. B. **Application of emergy accounting techniques to the sustainability of the Araranguá River estuary.** American Journal of Engineering Research. Volume-13, Issue-12, pp-136-144. 2024.

DE ASSIS COSSO, Sandro Pinheiro; DO AMARAL, Paulo Silas; MARIOSIA, Duarcides Ferreira. **As mudanças do clima e os desafios da gestão dos recursos hídricos nas Bacias do PCJ: evidências discursivas da ascensão de um novo paradigma.** 2020.

DE FREITAS, Carlos Eduardo Dias et al. **O instrumento de outorga e os limites ambientais: uma investigação sob a perspectiva da Economia Ecológica.** Revibec: revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica, v. 34, p. 0155-178, 2021.

FREITAS, Carlos Eduardo Dias de. **O instrumento de outorga e os limites ambientais para a exploração da água nas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá: uma investigação à luz da Economia Ecológica.** 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

JULIÃO, Nilton Lucio. **Gestão sustentável de recursos hídricos: proposta de uma matriz de avaliação dos indicadores de sustentabilidade das ações propostas no Plano de Bacias 2020/2035 dos Comitês das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá.** 2024.

MENDES, Jakeline Pertile. **Indicadores de sustentabilidade para gestão da segurança hídrica nas bacias hidrográficas PCJ: estudos de caso das sub-bacias dos Rios Atibaia e Piracicaba.** 2022.

ORELLANA GONZALEZ, Alba Maria Guadalupe. **Modelo de simulação dinâmica para valoração ecológica de serviços ecossistêmicos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá.** 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PATRIANI, Tainá Yumi. **A mitigação local de mudanças climáticas: discurso e atuação de vereadores nas bacias PCJ.** 2024. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PETRINI, Bruna Eveline Domingos. **Propostas de mecanismos de cobrança pelo uso da água no setor rural nas Bacias PCJ, visando o incentivo à adequação ambiental e recomposição florestal.** 2024.

PUGA, Bruno Peregrina; RUIZ GARCIA, Junior; GORI MAIA, Alexandre. **Governança dos recursos hídricos na bacia do rio Jundiá (São Paulo): desafios para uma governança integrada e adaptativa.** Revibec: revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica, v. 32, p. 0083-101, 2020.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE MISTURAS DE CARVÃO MINERAL E COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS VISANDO À CO-COMBUSTÃO COMO ALTERNATIVA PARA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NA REGIÃO SUL CATARINENSE

Márcia de Fátima Suquica Panzo¹, Everton Sidnei Renner², Thiago Fernandes de Aquino³, Elise Sommer Watzko⁴, Elaine Virmond⁵

¹ Universidade Federal de Santa Catarina/Graduação em Engenharia de Energia/marciafatima1407@gmail.com

² Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina/Centro Tecnológico/everton.renner@satc.edu.br

³ Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina/Centro Tecnológico/thiago.aquino@satc.edu.br

⁴ Universidade Federal de Santa Catarina/Departamento de Energia e Sustentabilidade/elise.sommer@ufsc.br

⁵ Universidade Federal de Santa Catarina/Departamento de Energia e Sustentabilidade/elaine.virmond@ufsc.br

Resumo: A geração de energia na região sul de Santa Catarina é historicamente dependente do carvão mineral, fonte associada a expressivos impactos ambientais. Simultaneamente, a destinação inadequada de resíduos sólidos urbanos (RSU) configura um desafio crescente. Neste contexto, este estudo consistiu numa análise preliminar da viabilidade técnico-energética da co-combustão entre o carvão da Camada Barro Branco e o Combustível Derivado de Resíduos (CDR) obtido de frações não recicláveis de RSU (papel/papelão, plásticos e poliestireno expandido – EPS). Foram preparadas cinco misturas carvão/CDR: 100% CDR (A1), 75%/25% (A2), 50%/50% (A3), 25%/75% (A4), 100% CDR (A5), que foram compactadas a 100 °C e 19 MPa. As amostras foram caracterizadas por análise imediata, análise elementar e poder calorífico, e ensaios preliminares de co-combustão foram realizados em um forno tubular (750-800 °C) de bancada laboratorial. Os resultados indicaram potenciais ganhos energéticos e ambientais com o uso de CDR. O poder calorífico superior aumentou de 18,83 MJ/kg (b.s., A1) para 23,96 MJ/kg (b.s., A5). O teor de cinzas diminuiu de 48,09% para 4,82%, enquanto o enxofre caiu de 2,16% para 0,11% e o nitrogênio de 0,91% para 0,24%, todos em base seca, sugerindo potencial redução das emissões de óxidos de enxofre e de nitrogênio durante a combustão. A eficiência de combustão superou 99% em misturas com $\geq 50\%$ de CDR, confirmando o desempenho técnico satisfatório. De forma geral, a partir dos resultados desse estudo preliminar, a co-combustão de carvão mineral e CDR se mostra uma alternativa promissora para diversificação da matriz energética e para o gerenciamento integrado de RSU na região sul catarinense.

Palavras-chave: carvão mineral; combustível derivado de resíduos; co-combustão; valorização energética; transição energética.

1 INTRODUÇÃO

O carvão mineral desempenhou papel central no desenvolvimento econômico e industrial da região sul de Santa Catarina, sustentando a geração de energia elétrica e térmica durante décadas. Contudo, a queima desse combustível fóssil está diretamente associada à emissão de gases de efeito estufa (GEE), de poluentes atmosféricos e à geração de grandes volumes de cinzas, o que reforça a necessidade de alternativas tecnológicas mais limpas e sustentáveis.

Paralelamente, a gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) constitui um desafio crescente no Brasil. Apesar dos avanços promovidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, de acordo com a ABRELPE (2020), o país gerou cerca de 79,6 milhões de toneladas de resíduos, dos quais apenas 59,5% tiveram destinação adequada em aterros sanitários, enquanto 40,5% ainda foram encaminhados a aterros controlados ou lixões. Esse cenário representa não apenas perda de valor energético, mas também a intensificação dos impactos ambientais decorrentes da disposição final. Nesse contexto, a produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) a partir de frações não recicláveis

de RSU desponta como alternativa promissora, capaz de reduzir o volume de resíduos destinados a aterros e contribuir para a diversificação da matriz energética (ABNT, 2020).

A integração do CDR em processos de co-combustão com carvão mineral tem sido objeto de estudo, apontando benefícios como incremento do poder calorífico do combustível, redução do teor de enxofre e mitigação parcial das emissões de poluentes (ZHANG et al., 2018; XU et al., 2020). No entanto, os efeitos dessa substituição variam conforme as características do resíduo, do carvão e das condições operacionais, o que evidencia a necessidade de pesquisas específicas para diferentes contextos regionais. Diante desse cenário, este trabalho avaliou o potencial de aplicação do CDR na co-combustão com carvão mineral da Camada Barro Branco, considerando aspectos técnicos, energéticos e ambientais. A investigação pretende subsidiar alternativas para a transição energética justa na região carbonífera catarinense, em consonância com políticas públicas e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, 7, 11, 12 e 13.

2 METODOLOGIA

A etapa experimental deste estudo compreendeu a preparação e caracterização dos combustíveis. O CDR foi produzido a partir de frações de papel/papelão, plástico macio e EPS, coletados no Campus Araranguá da UFSC, que foram triturados, higienizados e homogeneizados. O carvão mineral utilizado foi amostrado da Camada Barro Branco (CE-4500), fornecido pela SATC/Criciúma. Foram formuladas cinco misturas (Tabela 1) com teores crescentes de CDR (0%, 25%, 50%, 75% e 100%), que foram previamente compactadas a 100 °C e 19 MPa.

Tabela 1: Proporções dos constituintes nas misturas combustíveis.

Código	% Carvão	% Papel/papelão	% Plástico macio	% EPS ^a
A1	100	0	0	0
A2	75	19,65	4,6	0,75
A3	50	39,3	9,2	1,5
A4	25	58,95	13,8	2,25
A5	0	78,6	18,4	3

^a Poliestireno expandido.

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

As amostras de carvão mineral e CDR foram submetidas à caracterização físico-química, incluindo: (i) análise imediata: determinação dos teores de umidade (U), cinzas

(CZ), matéria volátil (MV) e carbono fixo (CF), seguindo normas ASTM; (ii) análise elementar: determinação dos teores de Carbono (C), Hidrogênio (H), Nitrogênio (N), Enxofre (S), Oxigênio (O) e Cloro (Cl) utilizando-se analisador elementar Leco CHN628; (iii) Poder Calorífico Superior (PCS): determinado em calorímetro Leco AC500 e PCI calculado pela Equação 1: $PCI = PCS - 2,43(9H + U)$, onde PCI é o Poder Calorífico Inferior em MJ/kg; PCS é o Poder Calorífico Superior em MJ/kg; H é a fração mássica do hidrogênio na amostra, determinada por meio de análise elementar; e U é o teor de umidade da amostra, determinado na análise imediata em % em massa. As composições das misturas foram determinadas por balanços de massa considerando misturas homogêneas.

Finalmente, ensaios preliminares de co-combustão foram realizados em forno tubular horizontal (Fortlab FT-1200/H) a 750-800 °C por 2h15min, com vazão de ar sintético de 1 L/min. A eficiência da combustão (rendimento mássico, η) foi calculada pela Equação 2: $\eta = 100 - \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \times 100$, onde m_f é a massa de cinzas (g), m_i é a massa de incombusto (g). Valores de η próximos a 100% indicam elevada completude da combustão, ao passo que valores inferiores refletem a presença de carbono fixo residual no resíduo sólido.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da caracterização físico-química (Tabela 2) evidenciaram diferenças marcantes entre os combustíveis.

Tabela 2: Resultados da caracterização físico-química das amostras.

Amostra	CZ (% b.s. ^a)	MV (% b.s.)	CF (% b.s.)	U (% c.r. ^b)	C (% b.s.)	H (% b.s.)	N (% b.s.)	S (% b.s.)	O (% b.s.)	Cl (% b.s.)	PCS (MJ/kg, b.s.)	PCI (MJ/kg, b.s.)
A1	48,09	16,6	35,31	1,28	44,15	2,69	0,91	2,16	2	0	18,83	18,22
A2	37,27	34,42	28,3	2,8	48,19	4,3	0,74	1,65	7,91	0	20,11	19,15
A3	26,46	52,25	21,3	4,33	52,22	5,91	0,58	1,14	13,83	0	21,39	20,07
A4	15,64	70,07	14,29	5,85	56,26	7,51	0,41	0,62	19,74	0,05	22,67	21,00
A5	4,82	87,89	7,28	7,38	60,3	9,12	0,24	0,11	25,65	0,06	23,96	21,93

^aBase seca; ^bBase conforme recebida.

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

O carvão apresentou alto teor de cinzas (48,09%, b.s.) e baixo teor de material volátil (16,60%, b.s.), enquanto os resíduos (especialmente plástico e EPS) exibiram baixíssimo teor de cinzas (<1,76%, b.s.) e altíssimo teor de voláteis (>97,49%, b.s.).

Conforme a proporção de CDR nas misturas aumentou, observou-se uma redução progressiva no teor de cinzas (de 48,09% para 4,82%, b.s.) e um aumento no teor de material volátil (de 16,60% para 87,89%, b.s.).

A análise elementar confirmou o enriquecimento das misturas em carbono e hidrogênio à medida que se aumentou a participação do CDR. O teor de enxofre, significativo no carvão (2,16%, b.s.), foi drasticamente reduzido para 0,11% (b.s.) na amostra com 100% de CDR (A5), indicando um potencial elevado para redução de emissões de SO_2 . Da mesma forma, o teor de nitrogênio diminuiu com o incremento de CDR na mistura, o que contribui para a redução das emissões de óxidos de nitrogênio durante a combustão. As emissões de óxidos de enxofre e de nitrogênio estão diretamente associadas à formação de chuva ácida, um dos principais impactos ambientais da queima de combustíveis fósseis. Os teores de cloro mantiveram-se baixos ($<0,1\%$) em todas as misturas, aspecto positivo para minimizar riscos de corrosão e a formação de dioxinas e furanos. O PCS apresentou aumento linear com a adição de CDR, passando de 18,83 MJ/kg (b.s., A1, carvão puro) para 23,96 MJ/kg (b.s., A5, CDR puro), superando o carvão de referência e evidenciando um ganho energético expressivo, sobretudo pela incorporação de papel/papelão e plásticos ao combustível.

Além das vantagens observadas na composição elementar e no poder calorífico, destaca-se que a emissão de NO_x depende não apenas da composição do combustível, mas também do design do sistema de combustão e do modo de operação. Nesse sentido, técnicas de mitigação podem potencializar os benefícios ambientais do uso de CDR. Uma das mais eficazes é a recirculação dos gases de combustão, que promove zonas de baixo excesso de ar e, conseqüentemente, reduz a formação de NO_x . Testes em escala piloto conduzidos por Virmond et al. (2021) demonstraram reduções próximas a 74% quando aplicada essa técnica em comparação à combustão convencional, o que reforça a relevância de integrar estratégias de controle às vantagens intrínsecas do combustível.

Nos ensaios preliminares de co-combustão, observou-se que o rendimento mássico (η) melhorou consistentemente com o aumento da fração de CDR, evoluindo de 97,59% para o carvão puro (A1) para 99,85% para o CDR puro (A5). Esse aumento na eficiência de conversão está diretamente relacionado à redução do teor de cinzas e ao aumento da fração volátil com a mistura de CDR ao carvão, o que promove uma combustão mais completa e rápida.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo preliminar demonstrou potencial viabilidade técnico-energética da co-combustão de carvão mineral e CDR derivado de RSU, podendo resultar em ganhos energéticos significativos, com aumento do poder calorífico e da eficiência de combustão, além de expressivos benefícios ambientais potenciais, como a redução do volume de resíduos destinados a aterros e a drástica diminuição do teor de enxofre no combustível, o que implica menor potencial de emissão de SO₂.

Entretanto, a presença de elementos-traço no CDR e nas misturas com carvão mineral e a composição química das cinzas desses materiais precisam ser avaliadas em relação ao potencial de emissão de poluentes tóxicos e à tendência à formação de escórias e sinterização durante a conversão térmica, aspectos que demandam estratégias de controle. Por exemplo, esses desafios podem ser contornados com a mistura de CDR ao carvão mineral em pequenas proporções.

AGRADECIMENTOS

À UFSC e ao Programa Institucional de Iniciação Científica e Tecnológica – PIICT - Bolsas PIBIC 2024/2025 (Edital Propesq 03/2024).

REFERÊNCIAS

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16849: **Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos: requisitos**. Rio de Janeiro, 2020.

VIRMOND, E. et al. Gaseous emissions from co-combustion of biosolids from the meat processing industry with wood. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 40, n. 5, p. 1-14, 2021.

XU, J.; HUANG, Q.; WANG, F. Co-combustion of municipal solid waste and coal for carbon emission reduction: A bi-level multi-objective programming approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 272, 2020.

ZHANG, S. et al. Influence on gaseous pollutants emissions and fly ash characteristics from co-combustion of municipal solid waste and coal by a drop tube furnace. **Waste Management**, v. 81, p. 33-38, 2018.

ELETRODOS A BASE DE ÓXIDO DE GRAFENO VISANDO APLICAÇÃO COMO ÂNODO EM CÉLULAS DE COMBUSTÍVEIS MICROBIOLÓGICAS: UMA REVISÃO

Ana Paula Cervinski¹, Elaine Virmond², Elise Sommer Watzko³

¹ Universidade Federal de Santa Catarina/Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade/cervinskiap@gmail.com

² Universidade Federal de Santa Catarina/Departamento de Energia e Sustentabilidade/elaine.virmond@ufsc.br

³ Universidade Federal de Santa Catarina/Departamento de Energia e Sustentabilidade/elise.sommer@ufsc.br

Resumo: O aumento do consumo de energia e de água, impulsionados pelo desenvolvimento econômico e populacional, têm gerado impactos significativos, como o aquecimento global e a escassez hídrica. Nesse contexto, as células de combustíveis microbiológicas (CCM) destacam-se por aliar o tratamento de águas residuais à geração de energia. No entanto, ainda existem desafios técnicos e econômicos, principalmente em relação aos materiais utilizados nos eletrodos do ânodo. Os materiais a base de grafeno, como óxido de grafeno e óxido de grafeno reduzido possuem características importantes que permitem otimizar o eletrodo aumentando sua condutividade elétrica e área superficial, obtendo melhores resultados em relação à transferência de elétrons das bactérias para o eletrodo. Dessa maneira, o objetivo deste trabalho é apresentar uma visão geral sobre os eletrodos baseados em óxido de grafeno aplicados como ânodos em CCMs. Para tal, foi realizada uma revisão bibliográfica da literatura, no período de 2018 a 2025, considerando a base de dados Scopus (Elsevier) e Web of Science. Foram selecionados manualmente 12 artigos para uma análise aprofundada considerando os materiais empregados na otimização do eletrodo em conjunto com o rGO, materiais de suporte, configuração e cultura da CCM, assim como resultados principais de densidade de potência (DP), densidade de corrente (DC) e resistência à transferência de carga (Rct). Conclui-se que os eletrodos baseados em rGO e GO tiveram desempenhos superiores quando aplicados em CCMs ao adicionar polímeros condutores em conjunto, como a Polianilina (PANI).

Palavras-chave: óxido de grafeno, célula de combustível microbiológica; ânodo

1 INTRODUÇÃO

As células de combustíveis microbiológicas (CCM) são dispositivos que permitem converter diretamente a energia química em energia elétrica a partir da degradação de compostos orgânicos através de bactérias exoeletrogênicas (Sonawane, et al., 2024). Ou seja, destacam-se por gerar energia simultaneamente ao tratamento de águas residuais, que podem ser de origens distintas, desde domésticas, industriais, agrícolas ou municipais (Dwivedi, et al., 2022).

No entanto, apesar do avanço nas pesquisas nessa área, a tecnologia de CCMs ainda é restrita a baixas densidades de potência e altos custos, dentre outras limitações. Especialmente, em relação ao seu desempenho, os eletrodos utilizados como ânodo e cátodo influenciam diretamente, assim diversos trabalhos publicados focam no aprimoramento, físico e químicos, dos materiais utilizados nesses componentes. Particularmente, o material do ânodo deve possibilitar a formação de biofilmes na sua superfície permitindo que as bactérias transfiram elétrons para o eletrodo e gerem eletricidade que será conduzida pelo circuito externo (Ojha e Pradhan, 2025).

Dentre os materiais que podem ser utilizados para otimização do ânodo, têm-se os a base de grafeno, como o óxido de grafeno (GO) e óxido de grafeno reduzido (rGO) que atribuem propriedades ao eletrodo como: maior número de sítios ativos, excelente

condutividade elétrica e boas propriedades mecânicas (Prathiba; Kumar; Rangasamy, 2025). Dessa maneira, o objetivo deste trabalho é apresentar uma visão geral sobre os eletrodos baseados em óxido de grafeno aplicados como ânodos em CCMs.

2 METODOLOGIA

Para elaboração desta revisão bibliográfica, foram selecionados artigos de pesquisa presentes na base de dados *Scopus (Elsevier)* e *Web of Science*, tendo como objetivo fornecer uma visão geral do estado da arte sobre eletrodos baseados em óxido de grafeno aplicados como ânodos em células de combustíveis microbiológicas.

Quanto aos critérios de busca, foi utilizada a seguinte expressão: “Graphene oxide” AND “Microbial fuel cell”, considerando os títulos, resumos e palavras-chave dos artigos. Inicialmente a busca resultou em um grande número de artigos, porém para discutir os dados relevantes para este trabalho foram selecionados manualmente 12 artigos para uma análise detalhada. Como termos de inclusão e exclusão, foi utilizado o período de 2018 à 2025, incluindo artigos de pesquisa que desenvolveram um eletrodo baseado em óxido de grafeno e aplicaram como ânodo em uma CCM.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os artigos selecionados estão detalhados na Tabela 01 quanto ao eletrodo que foi produzido e aplicado como ânodo na CCM, o suporte utilizando para fabricá-lo, configuração e cultura da CCM, assim como resultados de densidade de potência (DP), densidade de corrente (DC) e resistência à transferência de carga (R_{ct}).

A comparação entre os trabalhos selecionados é relevante, porém complexa, pois apesar de todos testarem o material produzido em uma CCM, são distintos entre si, desde os materiais utilizados na sua fabricação, substrato, cultura utilizada, tempo de experimento, condições operacionais, dentre outras, que afetam os resultados apresentados.

Isso pode ser observado, por exemplo, na ampla variação dos valores de densidade de potência que é influenciado por diversos parâmetros individuais de cada CCM. Porém, é importante salientar que todos relatam uma melhoria no desempenho da CCM com a adição do GO ou rGO. Pode-se observar que o eletrodo que obteve o maior valor para densidade de potência, funcionalizou fibra de carbono com Polianilina (PANI) e rGO, chegando a $8262,29 \text{ mW/m}^2$ (Wang, 2024). Outros resultados em destaque também

adicionaram polímeros na composição, como polidopamina (PDA) (Li et al., 2020; Liu, et al., 2021), poliacrilamida (PAM) (CHEN; XIE e ZHANG, 2019) e cloreto de poli(dialildimetilamônio) (PDDA) (Chen, et al., 2020).

Dentre os artigos selecionados, podemos observar a ocorrência de diferentes materiais utilizados como suporte do eletrodo, tradicionalmente, o mais utilizado foi o tecido de carbono (CC), porém também foram citados o feltro de carbono (CF), haste de grafite (HG), escova de carvão (CB) e escova de grafite (GB).

A resistência a transferência de carga (R_{ct}) também foi influenciada pela adição do rGO e/ou polímeros. A diminuição do seu valor indica uma melhora na atividade eletroquímica, especificamente na CCM, os resultados mostraram que a transferência de elétrons extracelular foi facilitada com a adição de rGO quando comparado ao material puro (Sayed, et al., 2021; Wang, 2024; Pareek; Sravan e Mohan, 2019).

Tabela 01 – Eletrodos modificados com óxido de grafeno aplicados como ânodo em CCM

Ref.	Ânodo	Suporte	CCM	DP (mW/m ²)	DC (mA/m ²)	R_{ct} (Ω)
Wang (2024)	CF-rGO-PANI	CF		8262,29	2610	1,38
Pareek; Sravan e Mohan (2019)	CGO	CC		6	9,9	6.98
Yaqoob, et al., (2021)	L-GO/ZnO	HG	Câmara dupla Cultura mista	1350×10^{-3}	142,98	-
Liu, et al., (2021)	rGO@PDA/CC	CC		988,1	-	-
Li, et al., (2020)	CC-PDA-rGO	CC		2047	6030	24
Chen, et al., (2020)	CC-PDDA-rGO	CC		2039,3	1590	-
Lin, et al., (2019)	PANI/RGO/CC	CC		306	-	-
Mohamed, et al., (2021)	WC + rGO/CF	CF		1120	5680	-
Zhao, et al., (2018)	rGO-PANI-Pitch-CB	CB	Cátodo a ar Cultura mista	862	-	219
Sayed, et al., (2021)	rGO-CB	CB		381	2470	150
Chen; Xie e Zhang (2019)	GB - O-rGO/PAM	GB		782	-	-
	CC/rGO/PAM	CC		350	-	-
Cao, et al.,(2021)	rGO/Ag	CC	Câmara dupla Cultura pura: S. oneidensis	0,66	3,85	12

Fonte: os autores (2025)

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão dos artigos selecionados indica que os ânodos baseados em compósitos contendo GO e rGO, especialmente quando adicionados também polímeros condutores como a PANI, chegam a valores superiores de densidade de potência, justamente por reduzirem a R_{ct} , facilitando a adesão do biofilme e a transferência de elétrons extracelular. No entanto, as vias de síntese dos materiais a base de grafeno tem

um custo elevado sendo necessárias pesquisas que visem reduzir esse custo para viabilizar sua aplicação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem, à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo apoio e recursos fornecidos ao longo deste trabalho e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

CAO, Bocheng; ZHAO, Zipeng; PENG, Lele; SHIU, Hui-Ying; DING, Mengning; SONG, Frank; GUAN, Xun; LEE, Calvin K.; HUANG, Jin; ZHU, Dan. Silver nanoparticles boost charge-extraction efficiency in *Shewanella* microbial fuel cells. *Science*, [S.L.], v. 373, n. 6561, p. 1336-1340, 17 set. 2021. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.abf3427>.

CHEN, Jia Yi; XIE, Pu; ZHANG, Ze Ping. Reduced graphene oxide/polyacrylamide composite hydrogel scaffold as biocompatible anode for microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal*, [S.L.], v. 361, p. 615-624, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.116>

CHEN, Xuepeng; LI, Yunfei; YUAN, Xiaole; LI, Nan; HE, Weihua; LIU, Jia. Synergistic effect between poly(diallyldimethylammonium chloride) and reduced graphene oxide for high electrochemically active biofilm in microbial fuel cell. *Electrochimica Acta*, [S.L.], v. 359, p. 136949, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136949>.

DWIVEDI, Kavya Arun; HUANG, Song-Jeng; WANG, Chin-Tsan; KUMAR, Sunil. Fundamental understanding of microbial fuel cell technology: recent development and challenges. *Chemosphere*, [S.L.], v. 288, p. 132446, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132446>.

LI, Yunfei; LIU, Jia; CHEN, Xuepeng; YUAN, Xiaole; LI, Nan; HE, Weihua; FENG, Yujie. Enhanced electricity generation and extracellular electron transfer by polydopamine–reduced graphene oxide (PDA–rGO) modification for highperformance anode in microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal*, [S.L.], v. 387, p. 123408, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2019.123408>.

LIN, Xiao-Qiu; LI, Zhi-Ling; LIANG, Bin; NAN, Jun; WANG, Ai-Jie. Identification of biofilm formation and exoelectrogenic population structure and function with graphene/polyaniline modified anode in microbial fuel cell. *Chemosphere*, [S.L.], v. 219, p. 358-364, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.212>

LIU, Haojia; ZHANG, Zhihao; XU, Yan; TAN, Xiao; YUE, Zhixuan; MA, Kexin; WANG, Yuqiao. Reduced graphene oxide@polydopamine decorated carbon cloth as an anode for a high-performance microbial fuel cell in Congo red/saline wastewater removal. *Bioelectrochemistry*, [S.L.], v. 137, p. 107675, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bioelechem.2020.107675>.

MOHAMED, Hend Omar; TALAS, Sawsan Abo; SAYED, Enas T.; PARK, SungGwan; EISA, Tasnim; ABDELKAREEM, Mohammad Ali; FADALI, Olfat A.; CHAE, Kyu-Jung; CASTAÑO, Pedro. Enhancing power generation in microbial fuel cell using tungsten carbide on reduced graphene oxide as an efficient anode catalyst material. *Energy*, [S.L.], v. 229, p. 120702, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2021.120702>.

OJHA, Ritesh; PRADHAN, Debabrata. The potential of microbial fuel cell for converting waste to energy: an overview. *Sustainable Chemistry For The Environment*, [S.L.], v. 9, p. 100196, mar. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100196>.

PAREEK, Alka; SRAVAN, J. Shanthi; MOHAN, S. Venkata. Graphene modified electrodes for bioelectricity generation in mediator-less microbial fuel cell. *Journal Of Materials Science*, [S.L.], v. 54, n. 17, p. 11604-11617, 30 maio 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-019-03718-y>.

PRATHIBA, S.; KUMAR, P. Senthil; RANGASAMY, Gayathri. Recent advancements on the development of microbial fuel cells: anode modification and scale-up challenges in upgrading anode electrode. *International Journal Of Hydrogen Energy*, [S.L.], v. 107, p. 123-134, mar. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.144>.

SAYED, Enas Taha; ALAWADHI, Hussain; OLABI, A.G.; JAMAL, Aisha; ALMAHDI, Menna Salah; KHALID, Juiaria; ABDELKAREEM, Mohammad Ali. Electrophoretic deposition of graphene oxide on carbon brush as bioanode for microbial fuel cell operated with real wastewater. *International Journal Of Hydrogen Energy*, [S.L.], v. 46, n. 8, p. 5975-5983, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.043>.

SONAWANE, Amol V.; RIKAME, Satish; SONAWANE, Shirish H.; GAIKWAD, Mahendra; BHANVASE, Bharat; SONAWANE, Shriram S.; MUNGRAY, Arvind Kumar; GAIKWAD, Ravindra. A review of microbial fuel cell and its diversification in the development of green energy technology. *Chemosphere*, [S.L.], v. 350, p. 141127, fev. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141127>.

WANG, Yuyang. Carbon felt electrode modified with RGO/PANI composite material for enhancing renewable energy storage in microbial fuel cells. *Renewable Energy*, [S.L.], v. 232, p. 121109, out. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2024.121109>.

YAQOOB, Asim Ali; IBRAHIM, Mohamad Nasir Mohamad; YAAKOP, Amira Suriaty; UMAR, Khalid; AHMAD, Akil. Modified graphene oxide anode: a bioinspired waste material for bioremediation of pb2+ with energy generation through microbial fuel cells. *Chemical Engineering Journal*, [S.L.], v. 417, p. 128052, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2020.128052>.

ZHAO, Na; MA, Zhaokun; SONG, Huaihe; WANG, Dingling; XIE, Yangen. Polyaniline/reduced graphene oxide-modified carbon fiber brush anode for highperformance microbial fuel cells. *International Journal Of Hydrogen Energy*, [S.L.], v. 43, n. 37, p. 17867-17872, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.007>

PROPOSTA DE UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA (UEPS) VOLTADO ÀS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO CONTEXTO DA ESCOLA PÚBLICA NO MUNICÍPIO DE ARARANGUÁ, SC

**Carina Ferraz Marcos¹, Carla de Abreu D'Aquino²,
Juarez Bento da Silva³, Katia Cilene Rodrigues Madruga⁴**

¹UFSC – PPGES | carinaferraz23.ufsc@gmail.com

²UFSC – PPGES | carla.daquino@ufsc.br

³UFSC – PPGTIC | juarez.silva@ufsc.br

⁴UFSC – PPGES | katiamadruaga08@gmail.com

Resumo: Este artigo apresenta uma proposta de Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), fundamentada na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel, com o objetivo de promover a construção ativa do conhecimento sobre Energias Renováveis por parte dos estudantes. A proposta, para ser trabalhada com uma turma de 3º ano do Ensino Médio de uma escola pública de Santa Catarina, foi estruturada a partir da identificação dos conhecimentos prévios (subsunçores), do uso de organizadores prévios, e de materiais potencialmente significativos. A metodologia adotada envolve uma abordagem qualitativa e descritiva, com atividades escritas, trabalhos em grupo, leituras de artigos, atividade com Realidade Aumentada, avaliação somativa e avaliação da sequência didática. Espera-se que a proposta de UEPS sirva de base para os professores aplicarem em suas aulas sobre Energias Renováveis. Destacando o envolvimento ativo dos alunos, a articulação entre saberes prévios e novos conhecimentos, e o desenvolvimento do pensamento crítico. A proposta demonstra o potencial das UEPS como instrumento eficaz no processo de ensino-aprendizagem no Ensino sobre Energias Renováveis.

Palavras-chave: Aprendizagem Significativa; Educação; Energias Renováveis.

1 INTRODUÇÃO

A presente proposta baseia-se na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel, que destaca a relevância dos conhecimentos prévios dos estudantes para que novas informações se integrem de forma não arbitrária e substancial à sua estrutura cognitiva (Farias, 2022), favorecendo uma aprendizagem ativa, crítica e duradoura, em oposição à simples memorização. Nesse contexto, embora seja cada vez mais urgente discutir questões ambientais e energéticas diante dos desafios das mudanças climáticas, o tema das energias renováveis ainda é tratado de maneira pontual e descontextualizada nos currículos brasileiros, dificultando a compreensão profunda e crítica do papel das fontes alternativas de energia para a sustentabilidade do planeta (Santos et al., 2024).

Como visto no trabalho de Marcos et al., 2025, “Estudo das Aplicações do Ensino Significativo Voltado às Energias Renováveis”, a abordagem desse conteúdo nas escolas ainda é limitada, mesmo sendo um tema muito relevante na atualidade, pois é essencial para construir um futuro mais sustentável. Dos 16 artigos encontrados sobre o Ensino de Energias Renováveis, 13 descreviam metodologias já aplicadas em sala de aula e 3 trabalhos não haviam sido aplicados, eram apenas propostas.

Percebe-se assim, a necessidade de metodologias que favoreçam a aprendizagem significativa e a articulação com a realidade dos estudantes para trabalhar este tema em sala de aula. Além disso, a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) prevê o trabalho com Temas Contemporâneos Transversais, como meio ambiente e sustentabilidade, mas sua efetivação depende do planejamento docente e de propostas pedagógicas consistentes (BRASIL, 2018).

Para tal, esse trabalho irá propor uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS). As UEPS são uma proposta metodológica de planejamento didático que tem como objetivo favorecer a aprendizagem significativa, conceito desenvolvido por David Ausubel. Foram sistematizadas por pesquisadores como Moreira e Masini, baseando-se nos princípios da teoria de Ausubel. Elas são uma forma de planejar aulas ou sequências didáticas que realmente ajudem o aluno a compreender e atribuir sentido aos conteúdos, ligando-os ao que ele já sabe (Adão; Maciel, 2021).

Nesse contexto, esta pesquisa propõe o desenvolvimento de uma UEPS sobre energias renováveis, articulada aos ODS 4, educação de qualidade, e ODS 7, energia limpa e acessível, com o intuito de promover uma aprendizagem mais crítica, consciente e voltada para os desafios socioambientais contemporâneos (ONU BR, 2015). Contribuindo assim, para a aprendizagem significativa dos temas propostos e uma educação comprometida com a transformação social e ambiental.

2 PROPOSTA METODOLÓGICA

A construção desta sequência didática foi pensada e construída para realidade de condições físicas da maioria das escolas públicas estaduais de Araranguá, Santa Catarina. Cabe ressaltar que essa proposta pode ser modificada e adaptada de acordo com a realidade de cada instituição de ensino a ser aplicada. As UEPS são um instrumento pedagógico desenhado justamente para promover a aprendizagem significativa. Elas fazem isso por meio de 8 etapas:

1. *Definição do tópico específico a ser abordado*: Seleção de um objeto de conhecimento que seja potencialmente significativo.
2. *Criação de situações iniciais para os alunos externarem seus conhecimentos prévios*: Criar/ propor situações que leve o aluno a externalizar seu conhecimento prévio.
3. *Proposição de situações-problema*: Reconhecer as questões pertinentes ao tema.

4. *Apresentação do conhecimento a ser abordado*: Apresentar conhecimentos a ser aprendido/ ensinado, diferenciando conceitos, em relação ao tema.

5. *Abordagem do tema em nível mais alto de complexidade*: Retomar os conceitos centrais e fundamentais do conteúdo da unidade, apresentando-os novamente, porém com um nível mais elevado de complexidade em relação à introdução inicial.

6. *Retomada das características mais relevantes*: Organizar todas as informações coletadas, abordar, discutir, demonstrar e entender o tema em termos mais específicos.

7. *Avaliação da aprendizagem na UEPS*: A avaliação deve ocorrer durante todo o processo, através da participação dos estudantes nas atividades propostas.

8. *Avaliação da UEPS*: Refletir sobre os resultados e ajustar a proposta caso necessário, com base nas avaliações e na observação do processo.

O quadro 1 apresenta as oito etapas da UEPS de forma resumida, com a metodologia de ensino/aprendizagem de cada etapa e a duração.

Quadro 1. UEPS resumida com tempo previsto para aplicação.

Etapa	Metodologia	Tempo previsto
Definição do tópico específico a ser abordado	Apresentação da proposta para a direção da escola e apoio pedagógico Roda de conversa com os professores de Ciências na Natureza	1,5 h
Criação de situações iniciais para os alunos externarem seus conhecimentos prévios	Compilado do filme “O menino que descobriu o vento” Discussão dos tipos de energia utilizadas no filme	1 aula (45 min)
Proposição de situações problema	Roda de conversa e questionamentos aos alunos	1 aula (45 min)
Apresentação do conhecimento a ser abordado	Apresentação de slides Divisão dos grupos para o seminário sobre Energias Renováveis Apresentação dos grupos do Seminário	3 aulas (2,25 h)
Abordagem do tema em nível mais alto de complexidade	Leitura de artigos sobre desenvolvimento sustentável e discussão com os demais alunos da turma	1 aula (45 min)
Retomada das características mais relevantes	Visita à UFSC Campus Araranguá e/ou Utilização do material de RA (Realidade Aumentada)	2 aulas (1,5 h)

Avaliação da aprendizagem na UEPS	Avaliação somativa individual	1 aula (45 min)
Avaliação da UEPS	Roda de conversa com os alunos	1 aula (45 min)
	Tempo total previsto com alunos	10 aulas (7,5 h)

Fonte: da autora.

4 RESULTADOS ESPERADOS

A proposta busca promover a aprendizagem significativa dos alunos sobre questões ambientais, incentivando a consciência individual e coletiva para o desenvolvimento sustentável. Ao envolver os estudantes em práticas ligadas à sustentabilidade, pretende-se formar cidadãos preparados para assumir papéis de liderança no futuro. Para os professores, a sequência didática oferece um material que estimula metodologias ativas, fortalecendo a cultura escolar voltada para a redução de impactos ambientais, o uso racional de recursos e a integração com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 4 e 7, que tratam de educação de qualidade e energia limpa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel oferece fundamentos sólidos para uma prática pedagógica mais reflexiva e transformadora. Ao reconhecer a importância dos conhecimentos prévios dos estudantes, essa teoria propõe um ensino que valoriza a construção ativa do saber, em oposição à simples memorização. Além disso, a adoção de metodologias ativas e de avaliações com caráter diagnóstico e formativo reforça o compromisso com uma educação que promove autonomia, criticidade e engajamento.

Nesse contexto, esta pesquisa propõe a elaboração de uma UEPS voltada ao tema das energias renováveis, integrada aos ODS 4 (Educação de Qualidade) e ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), com o objetivo de favorecer uma aprendizagem crítica, consciente e alinhada aos desafios socioambientais da atualidade (ONU BR, 2015). Dessa

forma, busca-se contribuir para a aprendizagem significativa dos conteúdos abordados e para uma educação comprometida com a transformação social e ambiental.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro que foi fundamental para realização desta pesquisa. Agradeço também à Escola Estadual de Araranguá que propiciou realizar a pesquisa em sua unidade escolar.

REFERÊNCIAS

ADÃO, F. J. A. M.; MACIEL, M. D. **Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS): uma proposta de atividade potencialmente significativa para o Ensino de Ciências**. Disponível em: <<https://www.cruzeirodosul.edu.br/wp-content/uploads/2021/07/Protudo-Fauli-Jose-Augusto-Mendes-Ad%C3%A3o.pdf>>. Acesso em 13/04/2025.

BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: MEC, 2018. Disponível em: <<http://basenacionalcomum.mec.gov.br/implementacao/praticas/caderno-de-praticas/aprofundamentos/191-aprendizagem-significativa-breve-discussao-acerca-do-conceito>>. Acesso em: 17/01/2024.

FARIAS, G. B. **Contributos da aprendizagem significativa de David Ausubel para o desenvolvimento da Competência em Informação**. *Perspectivas em Ciência da Informação*, v.27, n. 2, p. 58-76, abr/jun 2022.

MARCOS, C. F.; DAMASIO, F.; COSTA, S. **Caminhos da iluminação: uma proposta visando a interdisciplinaridade entre Biologia e Física**. *A Física na Escola*, v. 20, n. 1, 2022.

ONU BR – NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL – ONU BR. **A Agenda 2030**. 2015. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>>. Acesso em: 25/02/2024.

SANTOS, I. R. G.; BEZERRA, A. V. F.; SANTOS, J. P.; SANTOS, G. J.; FARIAS, J. J. L.; SANTOS, C. B. SILVA, J. M. **Educação ambiental e sustentabilidade: sob o olhar dos alunos do 9º ano do ensino fundamental**. *Diversitas Journal*, v. 9, n. 4, 2024.

ELETRODOS BASEADOS EM BIOCHAR PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR ELETRÓLISE DE ÁGUA: UMA REVISÃO COM FOCO EM BIOMASSA DE ARROZ

Gessica Candiottto Possamai¹; Afonso Henrique da Silva Júnior¹;
Luiz Fernando Belchior Ribeiro¹

¹ Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) / Programa de pós Graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGES) / gessicapossamai@gmail.com; afonso.silva@ufsc.br; luiz.ribeiro@ufsc.br

Resumo: A busca por alternativas sustentáveis para a produção de hidrogênio verde tem estimulado o uso de materiais carbonáceos derivados de biomassas agrícolas como precursores para eletrodos. Entre esses materiais, o biochar tem recebido atenção devido ao seu baixo custo, abundância e potencial de modificação estrutural e química. A casca de arroz constitui um resíduo agrícola abundante e renovável, com elevado potencial para a produção de biochar, através da pirólise. Esse material carbonáceo pode atuar como componente condutivo e ativo na formulação de eletrodos destinados à geração de hidrogênio. Este artigo de revisão tem por objetivo apresentar uma análise crítica do uso de biomassa de arroz e seu resíduo, a casca do arroz, como precursores de biochar, para fabricação de eletrodos aplicados na eletrólise da água. Para isso, foi realizada uma revisão de escopo para mapear a relevância no tema atual. São discutidos nesse trabalho os resultados bibliométricos obtidos utilizando diferentes combinações de palavras chaves, além dos métodos de síntese e ativação do biochar do arroz, sua aplicação em eletrocatalisadores para reações de evolução de hidrogênio (HER) e oxigênio (OER), além do conceito eletrólise da água assistida por biochar (BAWE). Observou-se que a eletrólise da água assistida por biochar fornece uma nova rota para a utilização de alto valor do biochar e a produção eficiente de hidrogênio. Por fim, são abordados os desafios e perspectivas futuras para a consolidação do biochar da casca de arroz como material estratégico na produção de hidrogênio.

Palavras-chave: casca de arroz, biochar, eletrólise da água, hidrogênio verde.

1 INTRODUÇÃO

A transição energética de combustíveis fósseis para energias renováveis requer a criação de uma cadeia de produção e distribuição de novos vetores energéticos, como o hidrogênio ou seus derivados. O uso de resíduos, como biomassas agrícolas ou subprodutos baratos, como o *biochar*, pode ser empregado como eletrodos em dispositivos eletroquímicos, permitindo a produção de hidrogênio mais acessível (Lofek et al., 2025). Várias matérias-primas de biomassa, como resíduos de colheitas, materiais lenhosos, resíduos verdes, esterco animal e resíduos agrícolas, incluindo a casca de arroz, podem ser usadas para produção de biochar, além de contribuir para a preservação da estabilidade dos ecossistemas em escala global (Ying et al., 2024).

De acordo com a FAO, o arroz ocupa a nona posição entre as *commodities* agrícolas produzidas no Brasil, registrando, em 2023, uma produção de aproximadamente 10,29 milhões de toneladas (FAO, 2025). Segundo o IBGE, nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina a produção em 2023 foi de 7,1 e 1,2 milhões de toneladas, equivalente a 80% da produção do país, demonstrando a importância da cultura para o extremo Sul do Brasil (IBGE, 2024). Esse volume expressivo de cultivo resulta na geração significativa de

resíduos, destacando-se a casca do arroz, camada fibrosa externa removida no processo de beneficiamento.

Através da pirólise, o resíduo da casca do arroz, apresenta-se como alternativa abundante e renovável para a produção de *biochar*, um material sólido caracterizado por sua composição rica em carbono, que pode ser empregado como material condutivo, suporte catalítico ou até mesmo componente ativo em eletrodos para produção de hidrogênio (Ying et al., 2024).

Dentre as formas de produzir hidrogênio verde, a eletrólise da água se destaca por sua versatilidade e maturidade tecnológica, além de possibilitar o aproveitamento direto de fontes renováveis, o que favorece a escalabilidade do processo. No processo de eletrólise, o potencial aplicado no eletrodo atua como força motriz, com o objetivo de permitir que ocorra a reação eletroquímica (Ying et al., 2024). Devido a esse protagonismo do eletrodo em uma célula eletroquímica, a busca de materiais de eletrodo mais eficientes e com menor custo tem sido alvo de inúmeras pesquisas nos últimos anos.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é de mapear a literatura existente sobre a utilização do resíduo da biomassa do arroz como alternativa renovável para a produção de biochar aplicados a dispositivos eletroquímicos para produção de hidrogênio, buscando identificar a extensão, natureza e lacunas do conhecimento que abrangem esse tema.

2 METODOLOGIA

Neste trabalho foi realizada uma revisão de escopo, conduzida a partir de uma busca na base de dados Scopus. A estratégia de busca foi definida de modo a contemplar os principais termos relacionados ao tema, utilizando as seguintes combinações de palavras-chave: ("*electrolysis*" OR "*green hydrogen*" OR "*hydrogen generation*") AND ("*biomass*") AND ("*rice*"). Não foram aplicadas restrições quanto ao período de publicação, de forma a permitir uma visão ampla da evolução das pesquisas sobre o assunto.

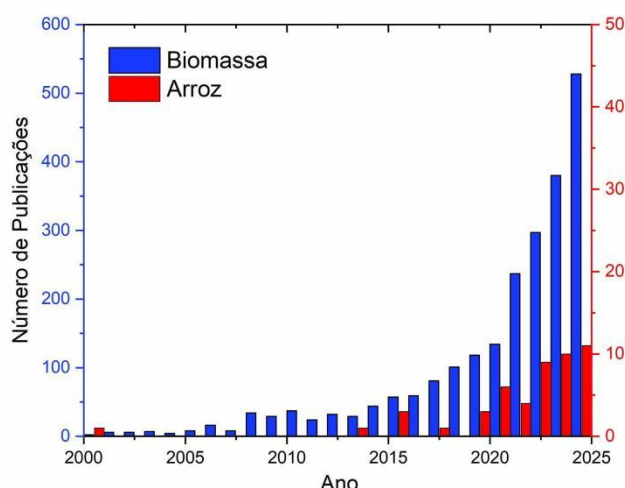
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise Bibliométrica

A pesquisa voltada para o aproveitamento de biomassas na produção de eletrodos para eletrólise tem se mostrado cada vez mais relevante, impulsionada pela necessidade de alternativas sustentáveis e de baixo impacto ambiental. Embora a utilização

da casca de arroz ainda represente uma parcela reduzida nesse cenário, observa-se na figura 01 que nos últimos anos, uma crescente demanda pelo uso desse material. Decorrente de seu caráter abundante, renovável e do potencial promissor na produção de biochar com propriedades adequadas para aplicações eletroquímicas.

Figura 01: Análise bibliométrica do número de publicações sobre a biomassa de arroz



Fonte: Os autores.

3.2 Aplicações do Biochar da Casca De Arroz Em Eletrólise

A pirólise é um dos processos mais eficientes e simples para a obtenção de biochar. Os produtos da pirólise de biomassa são bio-óleo, gás de pirólise e biochar. O processo de pirólise é realizado em um ambiente livre de oxigênio e sob condições de temperatura estritamente definidas. Além disso, a taxa de aquecimento da biomassa é crucial para a quantidade e a qualidade dos produtos obtidos no processo. O método pode ser dividido em pirólise lenta a 280-680 (°C) e pirólise rápida a 580-980 (°C). A escolha das condições do processo depende do produto desejado. O processo de pirólise rápida aumenta o rendimento de bio-óleo, enquanto o processo de pirólise lenta maximiza o rendimento de biochar (Lofek et al., 2025).

A casca de arroz apresenta uma composição química que a torna um precursor atrativo para a produção de biochar. Sua composição é formada por teores elevados de sílica amorfa (SiO_2), que podem variar entre 15% e 25%. A presença de sílica proporciona alta estabilidade estrutural e térmica ao biochar, o que favorece a formação de uma matriz rígida e porosa, atuando como suporte mecânico do eletrodo.

Após sua ativação química o biochar desenvolve alta superfície específica em rede de microporos que são fundamentais para a eletroquímica ativa nos eletrodos

condutores (Subbiah et al., 2025). Além disso, o biochar pode ser modificado por doping (N, S, P, metais de transição), o que melhora a condutividade elétrica e estabilidade eletroquímica, reduzindo o sobrepotencial e aumentando a eficiência da eletrólise da água (Subbiah et al., 2025).

Segundo Lofek et al. (2025), o uso de biochars funcionalizados com plasma e impregnados com cobalto como eletrocatalisadores, demonstraram boa atividade catalítica, com baixos potenciais e estabilidade operacional. Esse processo aumenta a presença de grupos do tipo -COO, que melhoram a interação entre a superfície do biochar e a fase ativa de cobalto, resultando em maior atividade eletrocatalítica na reação de evolução de oxigênio, destacando seu potencial para aplicações sustentáveis na produção de hidrogênio.

A eletrólise da água assistida por biochar (BAWE), consiste em utilizar o biochar como ânodo sacrificial, reduzindo a energia necessária para a eletrólise e produzindo H_2 de forma mais eficiente. É um método para produzir hidrogênio (H_2) a partir da água, usando biochar como componente chave no eletrodo. O biochar atua como um catalisador ou promotor de reação, facilitando a decomposição da água para produzir H_2 e oxigênio (O_2) (Lofek et al., 2025).

Os abundantes hidrocarbonetos aromáticos no biochar tornam sua reatividade maior do que a de materiais de carbono bem carbonizados ou grafitizados. O BAWE substitui a reação de evolução de oxigênio (OER) por reações de oxidação de biochar. Portanto, a eletrólise da água assistida por biochar (BAWE) fornece uma nova rota para a utilização de alto valor do biochar e a produção eficiente de hidrogênio eletrolítico. É uma estratégia inovadora para a produção de hidrogênio com economia de energia e para a valorização do biochar (Ying et al., 2024).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de biomassas agrícolas como o arroz e seus resíduos, para a produção de biochar aplicado em eletrólise da água é promissora e sustentável. Vem crescendo a cada ano, conforme mostra a números de estudos publicados. O biochar tem potencial para reduzir custos e ampliar a viabilidade do hidrogênio verde, mas requer avanços tecnológicos.

O uso de biochar na produção de hidrogênio oferece a oportunidade de desenvolver processos mais sustentáveis e eficientes, como a eletrólise da água assistida por biochar, mas ainda pode enfrentar desafios relacionados à instabilidade de eletrodos,

eficiência energética e otimização dos processos de pirólise para propriedades desejadas do biochar. É necessário também, investimentos em pesquisa, infraestrutura e desenvolvimento de políticas públicas para impulsionar sua adoção em larga escala.

Uma oportunidade futura seria o estudo de incorporação com outros elementos químicos, contribuindo com a produção de eletrodos mais eficientes.

5 AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), de acordo com o processo 140621/2025-3.

6 REFERÊNCIAS

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção Agropecuária. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/arroz/sc>. Acesso em: 09 set. 2025.

Kumar S, A., & Narasimman, K. (2025). Utilization of algal biomass-derived carbon in the alkaline water electrolysis for hydrogen production. *Renewable Energy*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123760>

Lofek, M., Wojtasik, M., Markowski, J., & Stelmachowski, P. (2025). Exploring the potential of biochars for boosting electrocatalytic oxygen evolution reaction. *Biomass and Bioenergy*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107770>

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). FAOSTAT. 2025. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/commodities_by_country. Acesso em: 03 set. 2025.

Subbiah, G., Singh, R. P., Deepak, K., Nayak, P. P., venkadeshwaran, K., Tiwari, A., Sahoo, J., & Priya K, K. (2025). Continuous pyrolysis of rice husk for sustainable biochar production and carbon sequestration: Recent advances and techno-economic perspectives. In *Results in Engineering* (Vol. 27). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106991>

Ying, Z., Du, Y., Gu, X., Yu, X., Zheng, X., Dou, B., & Cui, G. (2024). Biochar-assisted water electrolysis for energy-saving hydrogen production: Evolution of corn straw-based biochar structure and its enhanced effect on Cr (VI) removal. *Energy*, 305. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132277>

DETERMINAÇÃO DO BAND GAP ÓPTICO DE NANOCOMPÓSITOS $\text{TiO}_2/\text{FeS}_2/\text{SiOC}$ PARA APLICAÇÕES FOTOCATALÍTICAS

Olavo Antonio de Oliveira¹, Abel Augusto Nanza², Tiago Elias Allievi Frizon¹, Luiz Fernando Belchior Ribeiro¹

¹ UFSC/PPGES/Araranguá/olavoli20@gmail.com

² UFSC/EES/Araranguá

Resumo: A necessidade de mitigar os passivos ambientais associados à pirita (FeS_2), mineral abundante nas regiões carboníferas de Santa Catarina, e, ao mesmo tempo, explorar seu potencial como semicondutor em sistemas híbridos tem impulsionado o desenvolvimento de novos materiais. Neste trabalho, foi desenvolvido um nanocompósito à base de dióxido de titânio (TiO_2), dissulfeto de ferro (FeS_2) e oxicarbeto de silício (SiOC), com aplicação voltada à fotocatalise para geração de hidrogênio verde. As amostras foram obtidas pela mistura dos materiais em diferentes proporções e posterior tratamento térmico em ar a 400 °C. Os nanocompósitos produzidos, bem como os materiais puros, foram caracterizados por espectroscopia de refletância difusa (DRS) para determinação do band gap óptico. Os resultados mostraram que o aumento da fração de FeS_2 promoveu uma redução significativa no band gap, atingindo valores de até 2,33 eV, o que destaca o potencial fotocatalítico do material para a evolução de hidrogênio sob radiação visível.

Palavras-chave: Fotocatálise; Hidrogênio verde; Nanocompósitos; TiO_2 ; FeS_2 ; SiOC

1 INTRODUÇÃO

A região carbonífera de Santa Catarina, notadamente nos municípios de Criciúma, Siderópolis e Lauro Müller, acumula há décadas extensos passivos ambientais relacionados à mineração de carvão. A elevada presença de pirita (FeS_2) nas camadas geológicas locais resulta em drenagem ácida de minas (DAM), processo no qual ocorre a oxidação do sulfeto em contato com oxigênio e água, liberando ácido sulfúrico e metais tóxicos em corpos hídricos (Pedroso, 2024, p. 14; Peterson, 2008, p. 13). Esse fenômeno compromete rios como o Araranguá e o Tubarão, afetando ecossistemas aquáticos, agricultura e saúde pública.

Tradicionalmente vista como vilã ambiental, a pirita tem sido reavaliada sob a ótica da economia circular, com pesquisas indicando sua viabilidade de beneficiamento e produção de insumos em materiais avançados (Oliveira *et al.*, 2016). No entanto, persiste o desafio de converter esse mineral abundante e de baixo custo em recurso estratégico de valor agregado, alinhado às demandas da transição energética.

Devido suas características semicondutoras, a pirita apresenta grande potencial para aplicações fotocatalíticas. Quando combinada com outros semicondutores, como o dióxido de titânio (TiO_2), permite a formação de eficientes heteroestruturas para produção de hidrogênio via fotocatalise (Huerta-Flores *et al.*, 2018). Além disso, a utilização de matrizes cerâmicas de oxicarbeto de silício (SiOC), derivada de polímeros precursores, tem se mostrado relevante para atuar como suporte estrutural e contribuir com estabilidade

térmica e resistência química, prevenindo a degradação e melhorando sua eficiência fotocatalítica (Araldi da Silva *et al.*, 2022).

Nesse contexto, este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de nanocompósitos cerâmicos baseados em FeS_2 , TiO_2 e SiOC para aplicação em fotocatalise e geração de hidrogênio. Para determinar a melhor composição, o band gap óptico das amostras sintetizadas foi determinado por técnica de espectroscopia de refletância difusa (DRS) e os resultados comparados com os das amostras puras.

2 METODOLOGIA

Os nanocompósitos foram preparados a partir da mistura de TiO_2 (P25), pirita (FeS_2) comercial e uma resina pré-cerâmica (H44) precursora de oxycarbeto de silício. De forma a permitir a transformação da resina H44 em cerâmica, bem como para melhorar a interação entre as fases, as amostras produzidas foram tratadas termicamente em um forno mufla em temperatura de 400°C.

Após o tratamento térmico, os materiais foram investigados quanto seu band gap óptico utilizando a técnica de espectroscopia de refletância difusa (DRS). Para isso, as amostras foram analisadas em um espectrofotômetro UV-Vis-NIR 3600 i Plus (Shimadzu, Japão). A partir dos espectros obtidos, o band gap foi calculado pelo método de *Tauc*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 01 apresenta os valores de band gap óptico determinados para os materiais puros (TiO_2 , FeS_2 e SiOC) e para os diferentes nanocompósitos obtidos a partir de suas combinações após a tratamento térmico à 400°C.

Tabela 01 – Tabela com valores de *Band gap* obtidas pelo método Tauc.

Amostra	TiO2 (%)	FeS ₂ (%)	H44 (%)	Band Gap (eV)
TiO ₂	100	-	-	3,29
FeS ₂	-	100	-	1,50
H44	-	-	100	3,65
1	10	22,5	67,5	2,80
2	10	45	45	2,44
3	10	67,5	22,5	2,33
4	10	90	0	2,74

Fonte: O Autor (2025)

A caracterização óptica dos materiais puros mostrou resultados consistentes com a literatura. Os valores de 3,29 eV para o TiO_2 , bem como de 3,65 eV para o precursor cerâmico de SiOC, estão dentro dos valores típicos reportados para esses materiais comerciais (Araldi da Silva *et al.*, 2022). Já o FeS_2 exibiu band gap de 1,50 eV, próximo aos valores reportados para a pirita (0,95 eV) (Kuo *et al.*, 2018), mas um pouco mais elevado. Esse pequeno desvio pode ser justificado pelo tratamento térmico em ar a 400 °C, onde parte do FeS_2 pode sofrer uma leve oxidação superficial e consequentemente levando a formação de subprodutos com maiores valores de band gap como o óxido de ferro.

Nos nanocompósitos, observou-se uma redução significativa do band gap em relação ao TiO_2 e ao SiOC puros, evidenciando a contribuição da pirita para estender a absorção em direção à região visível. Na amostra com 22,5% de FeS_2 (Amostra 1), o band gap caiu para 2,80 eV, confirmando que mesmo pequenas frações de pirita são suficientes para modificar a estrutura eletrônica do nanocompósito. O menor valor de band gap foi obtido na Amostra 3 (67,5% de FeS_2 , 2,33 eV), indicando um efeito sinérgico entre TiO_2 e FeS_2 que favorece a sobreposição de estados eletrônicos e, consequentemente, a transição óptica.

No caso da Amostra 4, que apresenta a maior concentração de pirita, observa-se um aumento inesperado do band gap (2,74 eV), em contraste com a tendência observada até a Amostra 3. Este aumento inesperado pode ser atribuído a ausência nesse sistema da matriz de SiOC, a qual parece desempenhar um papel protetor, mitigando a oxidação da pirita. Assim, em composições intermediárias, o efeito combinado de proteção da matriz e interação interfacial favorece a redução do band gap, enquanto em composições muito ricas em FeS_2 o excesso de pirita exposta torna-se mais suscetível à oxidação, elevando novamente o band gap.

Do ponto de vista fotocatalítico, os nanocompósitos apresentam vantagens em relação às fases puras. Os valores intermediários de band gap, entre 2,3 e 2,8 eV, permitem absorção significativa na região visível, o que é desejável para aplicações em fotocatalise solar. Em particular, a Amostra 3 (2,33 eV) se destaca como mais promissora, conciliando absorção eficiente na região visível e possível formação de heterojunções favoráveis à separação de cargas, características essenciais para processos como a evolução fotocatalítica de hidrogênio.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, a formação de nanocompósitos $\text{TiO}_2/\text{FeS}_2/\text{SiOC}$ permitiu modular o band gap óptico em valores intermediários entre os materiais puros, favorecendo a absorção na região visível. A presença de FeS_2 foi determinante para a redução do band gap, com destaque para a composição intermediária (Amostra 3), que apresentou o menor valor (2,33 eV) e, portanto, maior potencial fotocatalítico. Por outro lado, o aumento do band gap na amostra com maior teor de pirita (Amostra 4) pode ser atribuído à oxidação parcial do FeS_2 durante o tratamento térmico em ar, efeito parcialmente mitigado pela matriz de SiOC. Dessa forma, a combinação balanceada entre TiO_2 , FeS_2 e SiOC mostrou-se estratégica para otimizar as propriedades ópticas, apontando os nanocompósitos como candidatos promissores para aplicações em fotocatalise, especialmente para produção de hidrogênio sob radiação solar.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo apoio financeiro essencial ao desenvolvimento deste estudo, bem como à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), por meio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia e Sustentabilidade (PPGES), pelo suporte institucional e acadêmico.

REFERÊNCIAS

- ARALDI DA SILVA, Bernardo *et al.* Synergetic one-step synthesis of $\text{SiC}/\text{SiOC}/\text{TiO}_2$ composites for visible-light-driven hydrogen generation from methanol reforming. **Ceramics International**, [s. l.], v. 48, n. 22, p. 32917–32928, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884222026475>. Acesso em: 25 jul. 2023.
- HUERTA-FLORES, Ali M. *et al.* Extended visible light harvesting and boosted charge carrier dynamics in heterostructured zirconate– FeS_2 photocatalysts for efficient solar water splitting. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, [s. l.], v. 29, n. 22, p. 18957–18970, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10854-018-0019-8>. Acesso em: 27 jul. 2023.
- KUO, Tsung-Rong *et al.* Extended visible to near-infrared harvesting of earth-abundant FeS_2 – TiO_2 heterostructures for highly active photocatalytic hydrogen evolution. **Green Chemistry**, [s. l.], v. 20, n. 7, p. 1640–1647, 2018. Disponível em: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C7GC03173D>. Acesso em: 20 jul. 2023.

OLIVEIRA, C. M. *et al.* Beneficiation of pyrite from coal mining. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 139, p. 821–827, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616312793>. Acesso em: 11 dez. 2024.

PEDROSO, Gabriela Joppert. **Beneficiamento e caracterização do rejeito piritoso do carvão mineral para aplicações tecnológicas**. 2024. 47 f. Dissertação de Mestrado no Programa de Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade - UFSC Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá (SC), 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/254372?show=full>. Acesso em: 2 set. 2025.

PETERSON, Michael. **Produção de sulfato ferroso a partir da pirita: desenvolvimento sustentável**. 2008. 128 f. Tese para Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - UFSC Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (SC), 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91664>. Acesso em: 2 set. 2025.

AGROENERGIA E PESTICIDAS: PRINCIPAIS CONTAMINANTES DA ÁGUA EM CULTURAS DE IMPORTÂNCIA ENERGÉTICA

Jennifer Rodrigues¹, Gessica Candiottto Possamai², Carla de Abreu D'Aquino², Luiz Fernando Belchior Ribeiro², Afonso Henrique da Silva Júnior²

¹ Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)/Graduanda em Engenharia de Energia

² Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)/Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGES)

Resumo: O setor agroenergético brasileiro tem se destacado na produção de biocombustíveis a partir de culturas como cana-de-açúcar, soja, milho, algodão, girassol e arroz. Contudo, esse avanço está diretamente associado ao uso intensivo de agroquímicos, cujos resíduos representam uma das principais fontes de contaminação hídrica. Este trabalho, em andamento, consiste em uma revisão bibliográfica de artigos científicos, relatórios técnicos e dados da plataforma Agrofit do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), abrangendo publicações entre 2000 e 2025. Os resultados preliminares apontam para a presença recorrente de herbicidas, inseticidas e fungicidas em águas superficiais e subterrâneas, com destaque para compostos como atrazina, glifosato, abamectina e diuron. Esses agroquímicos apresentam persistência ambiental, bioacumulação, toxicidade a organismos aquáticos e polinizadores, além de potenciais riscos à saúde humana. Conclui-se que compreender tais impactos é essencial para subsidiar políticas públicas, aprimorar estratégias de mitigação e fomentar práticas agrícolas sustentáveis que conciliem produtividade e preservação dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Culturas Energéticas, Agroquímicos, Contaminação Hídrica, Impactos Ambientais.

1 INTRODUÇÃO

O setor agroenergético tem assumido papel estratégico na matriz energética brasileira, contribuindo para a diversificação das fontes renováveis e para a redução da dependência de combustíveis fósseis. A produção de biocombustíveis a partir de culturas como cana-de-açúcar, soja, milho, algodão, girassol e arroz tem se consolidado como alternativa de grande relevância econômica e ambiental. Esse avanço, no entanto, está intrinsecamente associado ao uso intensivo de pesticidas, insumos amplamente aplicados para garantir o controle de pragas, doenças e plantas daninhas, bem como para sustentar elevados níveis de produtividade (YADAV *et al.*, 2025).

Apesar de sua importância agrônômica, o uso recorrente de pesticidas acarreta sérias preocupações ambientais e de saúde pública (MA *et al.*, 2019). A persistência dessas substâncias no solo, sua capacidade de mobilidade e o potencial de bioacumulação ampliam o risco de contaminação dos recursos hídricos (PERIS *et al.*, 2023). A lixiviação, o escoamento superficial e a deriva de pulverização figuram entre as principais vias de transporte de pesticidas para rios, lagos e lençóis freáticos, resultando em impactos que vão desde a degradação da qualidade da água potável até a redução da diversidade biológica aquática (YANG *et al.*, 2025).

Esse quadro de contaminação hídrica é particularmente preocupante em regiões de agricultura intensiva, onde o elevado volume de aplicações aumenta a carga de poluentes no ambiente (MA *et al.*, 2019). Estudos têm demonstrado que herbicidas como glifosato e atrazina, além de inseticidas neonicotinóides e fungicidas de uso recorrente, estão entre os

principais compostos detectados em águas superficiais e subterrâneas no Brasil e em outros países. Os efeitos adversos incluem toxicidade para organismos aquáticos, declínio de populações de polinizadores, desequilíbrio ecológico, resistência de microrganismos e potenciais riscos à saúde humana (LOPES; ALBUQUERQUE, 2018).

Diante desse cenário, torna-se essencial aprofundar a compreensão sobre os riscos decorrentes do uso intensivo de pesticidas em culturas de importância energética. Assim, o presente trabalho tem como objetivo identificar os principais pesticidas empregados em culturas agroenergéticas e avaliar seus impactos como contaminantes da água, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de estratégias de mitigação, políticas públicas e práticas agrícolas mais sustentáveis.

2 METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica, fundamentada em artigos científicos publicados em periódicos indexados, bem como em relatórios técnicos e em dados obtidos na plataforma Agrofita do MAPA (AGROFIT, 2025). Foram consideradas publicações disponíveis entre 2000 e 2025. As buscas foram realizadas em bases como *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect*, SciELO e PubMed, utilizando combinações de palavras-chave (pesticidas, agroquímicos, água, contaminação hídrica, culturas energéticas e impactos ambientais). Foram incluídos estudos originais com dados sobre a presença de pesticidas em águas superficiais e subterrâneas relacionados a culturas de relevância energética. Foram excluídos trabalhos fora do período definido, revisões sem dados primários e estudos com foco exclusivo em solo, ar ou resíduos agrícolas.

Por se tratar de um trabalho em andamento, a pesquisa encontra-se na etapa de levantamento, seleção e análise crítica das publicações e bases consultadas. Ao final da iniciação científica, pretende-se compilar os resultados em tabelas comparativas, destacando as principais substâncias identificadas, suas funções agronômicas, os produtos comerciais correspondentes, bem como os impactos ambientais associados. Essa sistematização permitirá uma visão consolidada dos contaminantes mais recorrentes e dos riscos relacionados às culturas de importância energética.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Principais Agroquímicos Utilizados e Sua Função

As culturas agroenergéticas apresentam elevada dependência de agroquímicos, sobretudo herbicidas, inseticidas e fungicidas, empregados no controle de plantas daninhas, pragas e doenças (MA *et al.*, 2019). Entre os herbicidas, destaca-se o glifosato, amplamente aplicado em lavouras de soja e cana-de-açúcar pela sua eficácia no manejo de espécies resistentes. Outro exemplo relevante é a atrazina, comum no cultivo de milho e cana, conhecida por sua seletividade, mas também pela elevada persistência no solo e na água, o que potencializa riscos de contaminação ambiental (LOPES; ALBUQUERQUE, 2018).

No grupo dos inseticidas, os neonicotinóides vêm sendo usados de forma recorrente no manejo de pragas, embora estudos evidenciem impactos severos sobre polinizadores e organismos aquáticos, comprometendo a biodiversidade (QIAN *et al.*, 2018). Estudos ressaltam que, embora o uso massivo seja justificado pelo aumento da produtividade, os danos ambientais e ecotoxicológicos tendem a superar os benefícios imediatos. Na cultura da cana-de-açúcar, é frequente a aplicação de herbicidas como piroxassulfona, tebuthiuron e diuron, enquanto em lavouras de soja e milho predominam inseticidas como acetamiprido e acefato, em resposta à elevada incidência de pragas sugadoras e mastigadoras (OBREGON *et al.*, 2025).

Em culturas como arroz e algodão, são comuns inseticidas de elevada toxicidade, incluindo abamectina, acefato e acetamiprido, já detectados em diferentes regiões do país e associados a efeitos adversos para organismos aquáticos e polinizadores. No caso dos fungicidas, embora menos estudados, compostos como azoxistrobina e acibenzolar-S-metílico têm sido identificados em áreas de cultivo de girassol, relacionados à contaminação hídrica (LOPES; ALBUQUERQUE, 2018).

De forma geral, evidencia-se um padrão de alta dependência de agroquímicos nas culturas agroenergéticas, sendo os herbicidas os compostos mais frequentemente associados à contaminação da água.

3.2 Agroquímicos na Água: Contaminação, Impactos e Perspectivas de Mitigação

A presença de agroquímicos em águas superficiais e subterrâneas próximas a áreas agroenergéticas é amplamente registrada, revelando um quadro preocupante de contaminação ambiental (YANG *et al.*, 2025). Estudos demonstram que substâncias como a atrazina já foram detectadas em concentrações acima dos limites legais em rios, enquanto o glifosato e seus metabólitos figuram entre os contaminantes mais recorrentes em regiões produtoras de soja. Essa situação se agrava pelo caráter cumulativo de muitos compostos, que permanecem ativos por longos períodos no ambiente aquático, comprometendo a qualidade da água destinada ao consumo humano e animal.

Os mecanismos de entrada desses poluentes nos corpos hídricos incluem o escoamento superficial durante chuvas intensas, a lixiviação de resíduos químicos até o lençol freático e a deriva de pulverização, que transporta partículas para áreas vizinhas aos cultivos (PERIS *et al.*, 2023). A gravidade desse problema não se restringe ao Brasil: na Europa, já foram identificados inúmeros agroquímicos e medicamentos em rios e córregos, incluindo substâncias persistentes que continuam contaminando a água mesmo após seu banimento (OBREGON *et al.*, 2025). Esse cenário reforça a vulnerabilidade dos recursos hídricos em regiões de agricultura intensiva e a necessidade de práticas mais seguras de manejo.

Os impactos ambientais decorrentes do uso intensivo de agroquímicos abrangem múltiplos níveis ecológicos e sociais. Entre os efeitos mais relevantes destacam-se a toxicidade para organismos aquáticos e polinizadores, causada por inseticidas como abamectina, acefato e alfa-cipermetrina; a bioacumulação e biomagnificação de compostos como acetocloro e diuron ao longo da cadeia alimentar; a resistência microbiana e fúngica associada a fungicidas como a azoxistrobina; além dos potenciais efeitos carcinogênicos e disruptores endócrinos de substâncias como o alacloro (QIAN *et al.*, 2018). Tais riscos comprometem não apenas a biodiversidade, mas também a segurança hídrica e alimentar (LOPES; ALBUQUERQUE, 2018).

Diante dessa realidade, torna-se essencial o fortalecimento de regulamentações mais rigorosas e o incentivo a práticas agrícolas sustentáveis que conciliem produtividade e preservação ambiental. Estratégias como o manejo integrado de pragas, o uso de bioinsumos, a agricultura de precisão, a implantação de barreiras vegetativas em áreas de cultivo e o monitoramento contínuo da qualidade da água configuram alternativas promissoras para reduzir os impactos da contaminação. Além disso, pesquisas em biorremediação e no desenvolvimento de tecnologias de aplicação mais eficientes apontam caminhos para uma transição gradual rumo a sistemas de produção agroenergética menos dependentes de agroquímicos e ambientalmente mais seguros.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da revisão mostram que as culturas agroenergéticas apresentam elevada dependência de agroquímicos, sendo herbicidas, inseticidas e fungicidas os principais responsáveis pela contaminação hídrica. Compostos como atrazina, glifosato, abamectina e diuron destacam-se pela persistência no ambiente e pelos efeitos adversos à biodiversidade e à saúde humana. Diante desse cenário, torna-se indispensável o fortalecimento de políticas

públicas, o monitoramento contínuo da qualidade da água e o incentivo a práticas agrícolas sustentáveis, de modo a conciliar produtividade com preservação ambiental.

REFERÊNCIAS

AGROFIT. Banco de informações sobre os produtos agroquímicos e afins registrados no Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/>>.

LOPES, C. V. A.; ALBUQUERQUE, G. S. C. de. Agrotóxicos e seus impactos na saúde humana e ambiental: uma revisão sistemática. **Saúde em Debate**, v. 42, n. 117, p. 518–534, jun. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0103-1104201811714>>.

MA, J. *et al.* Toxicological effects of pyraclostrobin on the antioxidant defense system and DNA damage in earthworms (*Eisenia fetida*). **Ecological Indicators**, v. 101, n. December 2018, p. 111–116, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.015>>.

OBREGON, D. *et al.* Global use of the Environmental Impact Quotient: A tool to indicate potential pesticide risk. **Science of The Total Environment**, v. 997, n. June, p. 180235, out. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180235>>.

PERIS, A. *et al.* Pesticide contamination of bird species from Doñana National Park (southwestern Spain): Temporal trends (1999–2021) and reproductive impacts. **Environmental Pollution**, v. 323, n. December 2022, p. 121240, abr. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121240>>.

QIAN, L. *et al.* Toxic effects of boscalid on the growth, photosynthesis, antioxidant system and metabolism of *Chlorella vulgaris*. **Environmental Pollution**, v. 242, p. 171–181, nov. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.055>>.

YADAV, P. *et al.* Pesticide pollution and mycoremediation: A review of classification, ecotoxicity, health impacts, and multi-omics approaches. **Bioresource Technology Reports**, v. 31, n. September, p. 102295, set. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102295>>.

YANG, L. *et al.* Environmental reproductive toxicity of common pesticides: Mechanisms and implications throughout the zebrafish life cycle. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 304, n. September, p. 119029, out. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.119029>>.

POTENCIAL DA PIRITA COMO FOTOCATALISADOR EM APLICAÇÕES AMBIENTAIS E ENERGÉTICAS: REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Emily Beatriz Nagildo¹, Natália Ueda Yamaguchi², Luiz Fernando Belchior Ribeiro³, Afonso Henrique da Silva Júnior⁴

1 Universidade Federal de Santa Catarina/ Energia e Sustentabilidade/ emily.b.nagildo@grad.ufsc.br

2 Universidade Federal de Santa Catarina/ Energia e Sustentabilidade/ natalia.ueda@ufsc.br

3 Universidade Federal de Santa Catarina/ Energia e Sustentabilidade/ luiz.ribeiro@ufsc.br

4 Universidade Federal de Santa Catarina/ Energia e Sustentabilidade/ afonso.silva@ufsc.br

Resumo: A pirita, um mineral abundante e de baixo custo, é um semicondutor o que a torna promissora para a fotocatalise. A revisão foi baseada em publicações entre 2014 e 2025, coletadas da base de dados Web of Science, com ênfase na análise das tendências de pesquisa, distribuição geográfica e áreas de investigação predominantes. Os resultados revelam um crescimento exponencial no número de publicações a partir de 2018, com um pico em 2024. A China e o Irã lideram a produção científica sobre o tema, refletindo o crescente interesse por soluções energéticas renováveis. As principais áreas de pesquisa incluem Química, Engenharia e Ciência dos Materiais. Apesar do crescente reconhecimento da pirita, desafios técnicos do material ainda requerem mais investigações.

Palavras-chave: Pirita, Fotocatálise, Energias Renováveis.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da geração de energia por meio de fontes renováveis junto com sua crescente demanda que impulsionou a busca por materiais semicondutores e com potenciais de servirem como fotocatalisadores em diversos cenários ambientais e energéticos (MARQUESA, et al, 2017). A fotocatalise é baseada no uso da energia luminosa para acelerar reações químicas. Pode ser aplicada na degradação de contaminantes orgânicos, tratamento de águas residuais, geração de hidrogênio e a conversão de energia solar em energia química (VALVERDE, 2016).

Dentro desse contexto, a pirita, FeS_2 , possui um grande potencial como aplicações fotocatalíticas. Um mineral sulfetado encontrado em depósitos geológicos associados ao carvão mineral. Quimicamente, trata-se de um dissulfeto de ferro cuja estrutura cristalina confere características eletrônicas relevantes, posicionando-a também como um material semicondutor. Apresenta band gap indireto relativamente estreito ($\sim 0,95$ eV), o que permite elevada absorção de radiação na região do visível, favorecendo aplicações em processos de conversão de energia solar. Assim, embora tradicionalmente classificada como rejeito da mineração e reconhecida por seus impactos ambientais negativos, a pirita vem sendo reavaliada na literatura científica como um semicondutor promissor, abundante e de baixo custo, com potencial para aplicações tecnológicas em células solares e processos ambientais sustentáveis (MARQUESA, et al, 2017).

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um estudo bibliométrico acerca da pirita em aplicações fotocatalíticas, com a finalidade de analisar as pesquisas na área e tendências emergentes.

2 METODOLOGIA

Para este estudo, os documentos foram coletados na base de dados *Web of Science*, que reúne diversas fontes de informação científica e permite o acesso a publicações de diferentes áreas do conhecimento. Essa plataforma oferece cobertura multidisciplinar de periódicos de alto impacto em todo o mundo, incluindo revistas de acesso aberto, sendo uma ferramenta confiável para identificar tendências, avaliar a produção científica e mapear os avanços na pesquisa acadêmica (CLARIVATE, 2025).

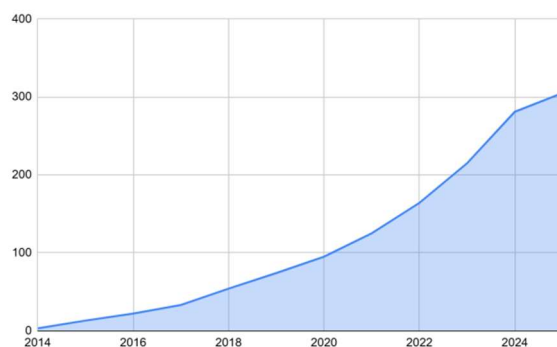
A busca foi realizada utilizando como palavras-chave de pesquisa “pirita”, “FeS₂”, “dissulfeto de ferro” e “photocat*” no campo tópicos. O objetivo foi reunir uma base bibliográfica completa sobre estudos que investigam a aplicação da pirita em processos fotocatalíticos, considerando publicações disponíveis nos últimos 10 anos. Para compreender as tendências da pesquisa, os estudos escolhidos foram analisados em relação ao ano de publicação, localização geográfica dos autores e áreas de pesquisa predominantes, permitindo mapear o desenvolvimento científico e padrões de investigação sobre o tema.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

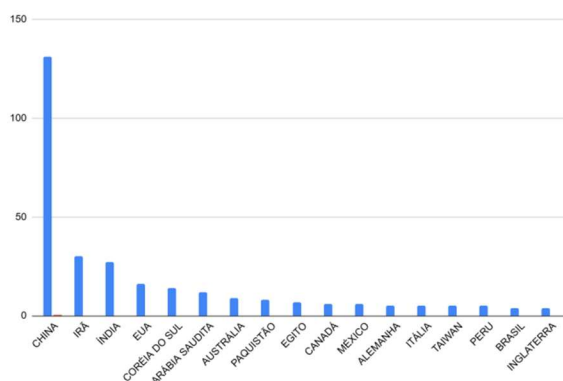
A pesquisa resultou em 417 publicações que foram filtrados em artigos e revisões, pertencentes à coleção principal da *Web of Science* e somente no idioma em inglês, resultando em 304 publicações.

Na Figura 1 apresenta o número de publicações com a evolução do número de pesquisas ao passar do tempo nos últimos 10 anos (Figura 1A) e sua distribuição por país com base na origem dos autores ou instituições associadas (Figura 1B).

Figura 1: (A) Número de estudos publicados por ano nos últimos 10 anos e sua (B) distribuição por países.



Fonte: os autores



Fonte: os autores

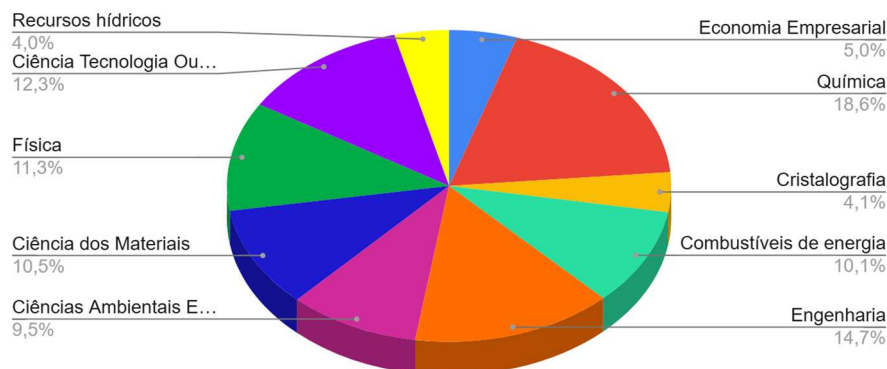
Os resultados obtidos mostram poucos trabalhos publicados até o período de 2020, com um total de 305, e um crescimento exponencial, até o ano de 2024 onde atingiu o maior índice de documentos durante o período observado e seguido por uma queda que prevê baixo número de publicações no ano de 2025. O aumento das publicações sobre a pirita como fotocatalisador está relacionado à sua abundância e baixo custo e à crescente necessidade de tecnologias para remediação ambiental. A partir de 2018 há maior interesse, impulsionado pela busca de soluções para a degradação de poluentes em água, movimento que se intensifica entre 2020 e 2024, resultando no pico de publicações em 2024 que expõe o reconhecimento do material como alternativa viável em processos fotocatalíticos e na degradação de poluentes (SHI, et al., 2022).

A distribuição de publicações apresenta um grande número na China e no Irã, em que evidencia uma liderança destes países que obtêm maiores investimentos além de enfrentam desafios ambientais, o que intensificou suas produções científicas na área de energias renováveis e tecnologias ambientais entre 2014 e 2025 (SHI, et al., 2022). Índia e Estados Unidos aparecem em seguida, que da mesma forma possuem interesse na busca por catalisadores de baixo custo. Já países como Brasil, Peru e Inglaterra têm uma pequena

participação, o que pode estar relacionado a limitações em infraestrutura de pesquisa e menor tradição em explorar a pirita para aplicações ambientais (WANG et al., 2025).

A Figura 3 apresenta as principais áreas de pesquisa que englobam o tema onde a área mais envolvida foi química (18,6%) e engenharia (14,7%) dos registros.

Figura 3: Áreas de pesquisa



Fonte: o autor

Com base nos resultados em áreas da Química e Engenharia é possível deduzir o interesse de estudos das propriedades eletrônicas do material buscando aplicações em processos tecnológicos a fins ambientais (GUO et al., 2023). Outros destaques são as áreas Ciência e Tecnologia (12,3%), Física (11,3%) e Ciência dos Materiais (10,5%), que ambas possuem o objetivo de investigação da estrutura da pirita para desenvolver sua eficiência fotocatalítica (OLIVEIRA et al., 2019). Já as áreas de Ciências Ambientais (9,5%) e Combustíveis de Energia (10,1%) reforçam a relevância da pirita em meios sustentáveis, tanto no tratamento de poluentes quanto no aproveitamento energético. E campos como Cristalografia (4,1%) e Recursos Hídricos (4,0%), contribuem para aspectos estruturais para aplicações em sistemas hídricos (ZhANG, 2020).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise das publicações revela uma tendência de crescimento exponencial na pesquisa com pirita como fotocatalisador impulsionada pela busca de soluções para remediação ambiental e liderada pelas áreas de Química e Engenharia, indicando um forte viés para aplicações tecnológicas. Emerge também uma tendência de expandir seu uso para o setor de energia, enquanto a concentração geográfica dos estudos na China sugere, como direção futura, a necessidade de fomentar a pesquisa em regiões sub-representadas, como o Brasil. Desta forma, as principais oportunidades para investigações futuras residem na transição de estudos laboratoriais para aplicações em cenários reais, especialmente na área

de Recursos Hídricos, e na promoção de uma maior colaboração interdisciplinar para explorar novas fronteiras e manter o dinamismo do campo.

REFERÊNCIAS

CLARIVATE. **Web of Science**. Disponível em: <https://www.webofscience.com/>. Acesso em: 28 set. 2025.

GONG, X. et al. Natural pyrite as a catalyst for a Fenton reaction to enhance xanthate degradation in flotation tailings wastewater. **Minerals**, v. 13, p. 1429, 2023.

GUO, J. et al. Molecular oxygen activation by citric acid boosted pyrite–photo-Fenton process for degradation of PPCPs in water. **Molecules**, v. 28, n. 2, p. 607, 2023.

MARQUESA, F. et al. Estratégias e Materiais utilizados em fotocatalise heterogênea para geração de hidrogênio através da fotocatalise da água. **Quim. Nova**, 2017.

OLIVEIRA, C. M. et al. Valorization of iron pyrite from coal mining in southern Brazil. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 2019.

SHI, X. et al. Stoichiometry-controlled synthesis of pyrite and greigite particles for photo-Fenton degradation catalysis. **New Journal of Chemistry**, p. 14205-14213, 2022.

VALVERDE, R. P.; MORAIS, A. C. M. de; CAIXETA, L. R.; CARNEIRO, G. T. Viabilidade no tratamento de efluente industrial através da utilização de reagente de Fenton e fotocatalise heterogênea. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 11, n. 1, p. 35, 2016.

WANG, J. et al. Photocatalytic activity and stability of carbon nitride–pyrite composites. **Applied Catalysis B: Environmental**, 2025.

ZHANG, Q.; et al. Stabilization and Utilization of Pyrite under Light Irradiation. **ACS Omega**, v. 5, n. 27, p. 17132-17141, 2020.

ANÁLISE COMPARATIVA DA IRRADIÂNCIA SOLAR EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MONOCRISTALINOS: TECNOLOGIAS MONOFACIAL VERSUS BIFACIAL

Jonathan Maceda Silveira¹, Giuliano Arns Rampinelli²

¹ Universidade Federal de Santa Catarina / PPGES / jonathan.maceda@hotmail.com

² Universidade Federal de Santa Catarina / PPGES / giulianorampinelli@gmail.com

Resumo: Este artigo apresenta uma análise experimental e uma modelagem numérica preliminar da irradiância solar em sistemas fotovoltaicos bifaciais e monofaciais instalados sobre diferentes tipos de solo — areia clara, brita branca e brita escura — com foco na influência do albedo. A pesquisa foi conduzida na Planta Solar Fotovoltaica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em Araranguá (SC), com dados coletados entre fevereiro de 2023 e maio de 2025. Os registros foram validados com base nos dados oficiais do LABREN (ID2036), assegurando consistência e confiabilidade. Para o tratamento dos dados, foi desenvolvido um script em Python que automatiza rotinas de higienização, interpolação linear e segmentação temporal, com controle de qualidade rigoroso. Um filtro limitou a interpolação a no máximo 15% dos dados válidos por dia, garantindo rastreabilidade. Os resultados indicaram mais de 90% de completude nas séries temporais e desempenho superior dos sistemas bifaciais em ambientes com alto albedo. Os dados comparativos reforçam a coerência dos registros locais e a aplicabilidade dos métodos utilizados. A pesquisa contribui para o avanço da geração solar no Brasil, alinhando-se ao Plano Decenal de Expansão de Energia e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7 e 13).

Palavras-chave: Módulos bifaciais, Irradiância solar, modelagem.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos já atingiram a maturidade tecnológica, consolidando-se como uma das principais fontes de geração renovável devido à sua confiabilidade operacional, competitividade econômica e contribuição para a sustentabilidade energética global (REN21, 2023; IRENA, 2023). Nesse contexto, os módulos bifaciais têm ganhado destaque expressivo no mercado. Em 2023, as células bifaciais representaram aproximadamente 90% da produção mundial, sendo que cerca de 50% dos módulos comercializados já eram bifaciais, e a expectativa é que sua participação alcance 70% até 2028 (IEA-PVPS, 2023).

Essa tecnologia apresenta vantagens relevantes em relação aos módulos monofaciais, principalmente pelo aproveitamento simultâneo da radiação incidente na face frontal e da radiação refletida pelo solo na face posterior, resultando em ganhos bifaciais que variam entre 5% e 30%, a depender de fatores como albedo do solo, configuração do arranjo e condições climáticas locais (GUO; YANG; STEIN, 2019; GUO et al., 2020; CUEVAS et al., 2018).

A transição energética no Brasil exige soluções que ampliem a eficiência da geração de energia renovável, reduzam emissões e fortaleçam a segurança energética. Nesse contexto, os sistemas fotovoltaicos bifaciais apresentam potencial relevante por aumentarem a geração em diferentes condições de albedo e instalação, alinhando-se às metas de diversificação da matriz e à redução de gases de efeito estufa previstas no Plano Decenal de Expansão de Energia (EPE, 2024). Além disso, a pesquisa está em consonância com os

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7 e 13), que buscam garantir energia acessível e limpa, bem como ações contra as mudanças climáticas (ONU, 2015).

Este trabalho tem como propósito realizar uma análise experimental e uma modelagem numérica preliminares do perfil e da distribuição da irradiância solar em uma Planta Solar Fotovoltaica, comparando módulos monofaciais e bifaciais instalados sobre diferentes tipos de solo — areia clara, brita branca e brita escura — a fim de avaliar a influência do albedo no ganho bifacial e na eficiência global do sistema.

2 METODOLOGIA

A Planta Solar Fotovoltaica em estudo é composta por dois sistemas distintos: um sistema fotovoltaico bifacial com potência nominal de 6,36 kWp e outro monofacial com potência nominal de 5,52 kWp. Ambos estão instalados no Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde (CTS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), localizado no município de Araranguá, estado de Santa Catarina, Brasil, região Sul. São seis sistemas fotovoltaicos distribuídos conforme o tipo de solo e o tipo de módulo. Em solo de areia clara, estão os sistemas 72, com módulo monofacial, e 48, com módulo bifacial. Sobre brita branca, encontram-se os sistemas 35, monofacial, e 23, bifacial. Já em brita escura, operam os sistemas 81, com módulo monofacial, e 84, com módulo bifacial.

A avaliação do desempenho dos sistemas é fundamentada em dados empíricos obtidos por meio da plataforma de monitoramento da própria Planta Solar Fotovoltaica. O período de análise compreende os meses entre fevereiro de 2023 e maio de 2025.

Os dados de irradiação solar global no plano inclinado, foram determinados a partir de medições diretas realizadas pelo sistema e posteriormente confrontados com os dados disponibilizados pelo Laboratório de Energia Solar (LABREN, usado como referência local o ID2036), visando à validação e consistência dos registros.

Para o tratamento e análise dos dados, empregou-se a linguagem de programação Python, por meio de um script desenvolvido especificamente para este trabalho. O código implementa uma série de rotinas automatizadas, incluindo a validação e higienização dos dados, conversão de formatos, cálculo da irradiância com base nas correntes contínuas (DC) e nas características técnicas dos módulos fotovoltaicos (corrente no ponto de máxima potência IMP). Adicionalmente, foram criadas variáveis temporais para segmentação dos dados por dia e por mês, facilitando a análise sazonal.

Foram adotados critérios rigorosos de controle de qualidade, incluindo a interpolação de dados ausentes por meio da técnica linear simples, que permite reconstruir

séries temporais com curvas suaves e fisicamente coerentes. O processo registra métricas de integridade antes e após a interpolação, como a quantidade de valores nulos ou iguais a zero, permitindo avaliar o impacto da correção. Para garantir rastreabilidade e transparência, é aplicado um filtro que limita a interpolação a no máximo 15% dos dados válidos. Caso esse limite seja ultrapassado no dia, o script automaticamente limpa os dados desse dia o excluindo do restante da análise, evitando que a interpolação comprometa a representatividade estatística do conjunto. Os resultados são agrupados conforme o tipo de sistema fotovoltaico, características do solo e período de medição, permitindo análises comparativas entre diferentes configurações e condições ambientais.

Por fim, os dados processados foram utilizados para a geração de gráficos comparativos entre os diferentes sistemas fotovoltaicos analisados e os valores de referência obtidos da fonte oficial, o laboratório de referência em energia solar (LABREN). Esses gráficos permitem avaliar o desempenho relativo dos sistemas em diferentes condições de solo e configuração, além de validar os resultados obtidos por meio da interpolação e das estatísticas aplicadas. A comparação visual com os dados do LABREN contribui para a verificação da consistência dos dados e para a identificação de padrões relevantes no comportamento da geração fotovoltaica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de qualidade dos dados

Antes da aplicação dos métodos de interpolação, foi realizada uma análise da qualidade dos dados de irradiância acumulada (H_{real}) para cada sistema fotovoltaico monitorado. Os resultados indicam que, de modo geral, os conjuntos de dados apresentam alta completude, com percentuais de dados válidos superiores a 90% em todos os sistemas avaliados.

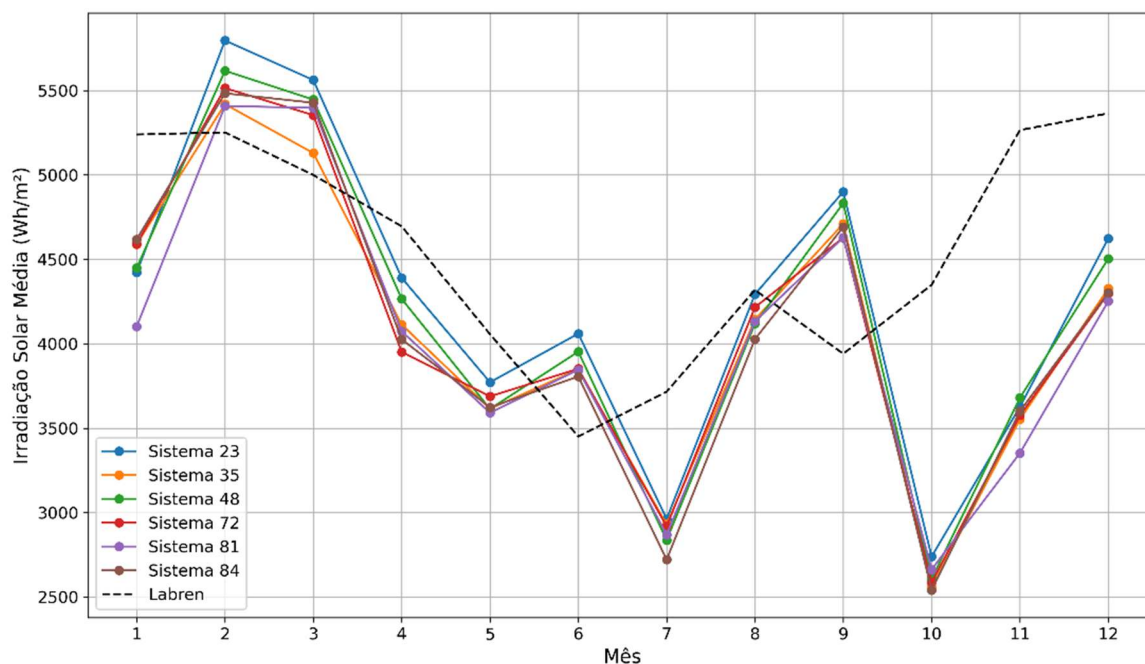
Esses resultados reforçam a necessidade de aplicação de técnicas de interpolação para reconstrução dos dados faltantes, garantindo a continuidade das séries temporais e a confiabilidade das análises subsequentes. A identificação precisa dos percentuais de dados válidos e nulos por sistema e por variável permite uma abordagem direcionada na correção dos dados, respeitando as particularidades de cada configuração fotovoltaica.

3.1 Comparação dos dados de irradiação local com dados oficiais LABREN

A comparação entre os dados de irradiação solar obtidos localmente e os dados oficiais disponibilizados pelo LABREN (Laboratório de Energia Solar do INPE) permite avaliar

a confiabilidade das medições realizadas em campo, bem como identificar eventuais divergências que possam influenciar análises energéticas e simulações de geração fotovoltaica. Ao confrontar as séries temporais, observa-se uma tendência consistente dos dados locais em acompanhar o padrão de variação apresentado pelo modelo oficial do LABREN, conforme ilustrado na Figura 1, o que reforça a validade das medições e sua aplicabilidade em estudos técnicos.

Figura 1 – Comparativo Irradiação Solar média mensal anual.



Fonte: De autoria própria (2025)

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da qualidade dos dados de irradiância acumulada evidenciou elevada completude nas séries temporais dos sistemas fotovoltaicos avaliados, com mais de 90% de registros válidos ao longo do período estudado. A ocorrência de valores nulos ou iguais a zero justificou a aplicação da técnica de interpolação linear simples, que possibilitou a reconstrução dos dados ausentes de forma suave e fisicamente coerente. Para garantir a integridade das análises, os dias em que mais de 15% dos dados interpolados foram desconsiderados. A metodologia adotada incluiu o registro de estatísticas antes e depois da interpolação, assegurando rastreabilidade e controle de qualidade. Adicionalmente, foram calculadas métricas estatísticas clássicas e robustas, agrupadas por tipo de sistema, tipo de solo e período de medição. Por fim, foram gerados gráficos comparativos com os dados de referência

do LABREN, contribuindo para a validação dos resultados e para uma compreensão mais aprofundada do desempenho relativo entre diferentes configurações fotovoltaicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pela bolsa de mestrado, essencial para este trabalho, e ao CNPq pelo apoio à pesquisa acadêmica. A investigação foi desenvolvida no PPGES/UFSC, com suporte do NTEEL.

REFERÊNCIAS

CUEVAS, A. et al. Bifacial solar cells: A review and developments. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 184, p. 2-12, 2018.

GUO, S.; YANG, D.; STEIN, J. S. Performance and modeling of bifacial photovoltaic modules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 104, p. 500-516, 2019.

GUO, S. et al. Quantifying bifacial photovoltaic gain and its dependence on albedo and installation parameters: A case study. *Solar Energy*, v. 196, p. 305-318, 2020.

IEA-PVPS. Snapshot of Global PV Markets 2023. International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme, 2023.

IRENA. Renewable Capacity Statistics 2023. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2023.

REN21. Renewables 2023 Global Status Report. Paris: REN21, 2023.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2034. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 2 set. 2025.

ONU. Organização das Nações Unidas. Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova Iorque: ONU, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 2 set. 2025.

MODELO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS PARA ANÁLISE DA ADEQUAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO COM GRANDE INTEGRAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS

Aline Rodrigues¹, Leonardo Elizeire Bremermann², Giuliano Arns Rampinelli³

¹ Universidade Federal de Santa Catarina/Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade/aline.rodrigues.a@outlook.com

^{2,3} Universidade Federal de Santa Catarina/Departamento de Energia e Sustentabilidade/Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade/leonardo.bremermann@ufsc.br/giuliano.rampinelli@ufsc.br

Resumo: Este trabalho revisa a literatura sobre a integração de veículos elétricos (VEs) em sistemas elétricos de potência (SEP), abordando impactos operacionais, confiabilidade, estratégias de carregamento e interação com fontes renováveis. O objetivo é analisar como a crescente penetração de VEs afeta a demanda, a qualidade e a confiabilidade da rede elétrica, além de identificar soluções para mitigar impactos negativos. A metodologia adotada foi uma pesquisa exploratória por meio de revisão bibliográfica de artigos e livros recentes sobre VEs, confiabilidade, estratégias de carregamento e integração com energias renováveis. Os resultados indicam que o carregamento de VEs pode gerar sobrecargas, desequilíbrios de tensão, distorções harmônicas e redução do fator de potência, afetando transformadores e equipamentos, especialmente em redes de baixa tensão ou com alta penetração de veículos. Estratégias inteligentes de gestão de carga, associadas a programas de resposta à demanda, contribuem para reduzir índices de perda de carga e energia não suprida. O modo vehicle-to-grid (V2G) permite controlar picos de demanda, melhorar a qualidade da energia e fornecer serviços auxiliares à rede. A integração de VEs com sistemas fotovoltaicos e armazenamento de energia em baterias aumenta a confiabilidade, enquanto concentrações mal distribuídas de carga podem causar perdas e envelhecimento de transformadores, evidenciando a necessidade de planejamento coordenado e soluções técnicas para garantir confiabilidade e eficiência energética.

Palavras-chave: Veículos Elétricos; Confiabilidade; Energias Renováveis; V2G.

1 INTRODUÇÃO

A crescente penetração de veículos elétricos (VEs) combinada com a inserção sólida e gradual da energia solar fotovoltaica e da energia eólica, transforma a geração e o consumo de eletricidade e a mobilidade urbana. Integrados a redes inteligentes e sistemas de armazenamento, os VEs possibilitam serviços como *vehicle-to-grid* (V2G), aumentando a flexibilidade da rede e contribuindo para a redução de emissões de gases de efeito estufa (Bremermann, 2014; Brasil, 2024). Em 2023, os VEs representaram 18% das vendas globais, com previsão de ultrapassar 20% em 2024, liderados por China, Europa e Estados Unidos (IEA, 2024). No Brasil, a frota de híbridos puros (HEV) e veículos elétricos a bateria (BEVs) pode superar 1 milhão até 2030, refletindo mudanças na indústria automotiva e no consumo de energia elétrica (Brasil, 2024).

Apesar dos benefícios, os VEs aumentam a carga do sistema, podendo gerar picos de demanda e afetar a confiabilidade, especialmente diante da intermitência de fontes renováveis (Delgado *et al.*, 2017; Pandit; Nguyen, 2023). Estratégias de carregamento inteligente e integração coordenada com energias renováveis são essenciais para mitigar esses impactos. Este trabalho revisa a literatura técnica e científica sobre a integração de VEs aos sistemas elétricos, destacando desafios e soluções para garantir a estabilidade e a confiabilidade do sistema elétrico de potência.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada consiste em uma pesquisa exploratória, conduzida por meio de revisão bibliográfica. Segundo Marconi e Lakatos (2017), a pesquisa bibliográfica utiliza como base em textos, como livros, artigos científicos, jornais, revistas, entre outros. Sendo os artigos científicos o principal foco por apresentarem conhecimento recente e avançado (Marconi; Lakatos, 2017). Segundo Gil (2008), pesquisas exploratórias visam desenvolver conceitos e formular problemas ou hipóteses futuras, com planejamento flexível e uso de levantamento bibliográfico, documental, entrevistas ou estudos de caso, sem técnicas quantitativas. Neste trabalho, a revisão aborda a literatura técnica e científica sobre veículos elétricos, confiabilidade em sistemas elétricos, estratégias de carregamento e energias renováveis.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Impactos operacionais dos VEs nos SEP

A transição para a mobilidade elétrica traz desafios e oportunidades às redes de potência, afetando demanda, estabilidade e confiabilidade. O consumo elevado de energia pelos veículos elétricos (VEs) pode causar sobrecargas, picos de demanda e flutuações de tensão, especialmente em regiões com alta concentração de VEs (Acharige *et al.*, 2024; Arslanoğlu; Büyük, 2025). Helm *et al.* (2020) mostraram que, em uma rede residencial alemã de 57 nós, o carregamento monofásico de VEs em cenários de alta penetração (23%) gera desequilíbrios temporários superiores a 2%, quedas de tensão e perdas, evidenciando a necessidade de considerar VEs no planejamento de redes de baixa tensão e na avaliação da qualidade da energia.

3.2 Confiabilidade do SEP

A confiabilidade, definida pelo IEEE Std 493-2007 como a capacidade de um sistema ou componente de desempenhar funções requeridas sob condições especificadas por um período determinado, traduz-se na prática em garantir fornecimento contínuo e de qualidade, analisando geração, transmissão e distribuição e o desempenho de seus componentes (IEEE, 2007; Kutjuns; Zemite, 2009). A penetração de VEs aumenta a vulnerabilidade da rede, mas estratégias de gestão inteligente podem mitigar esses impactos. Sadeghian *et al.* (2019) mostraram que veículos elétricos *plug-in* (PEVs) combinados com programas de resposta à demanda (RD) reduzem LOLE (expectativa de perda de carga) e

EENS (energia esperada não fornecida), enquanto Omoyiwola e Davari (2025), utilizou simulações de Monte Carlo para avaliar a confiabilidade de sistemas tradicionais (petróleo, hidrelétrica, carvão e nuclear), 100% fotovoltaico (SFV) e híbridos como SFV-bateria. Os resultados mostraram que o SFV isolado apresenta falhas frequentes devido à intermitência, enquanto a adição de baterias reduz perdas de carga e energia não atendida, evidenciando que sistemas híbridos conciliam sustentabilidade e confiabilidade.

3.3 Estratégias de carregamento e integração de VEs

As estratégias de integração de VEs incluem *grid-to-vehicle* (G2V), em que os veículos recebem energia da rede e podem ser gerenciados para reduzir picos, e *vehicle-to-grid* (V2G), em que devolvem eletricidade à rede, auxiliando na regulação de frequência, controle de tensão e redução de picos de carga (Kumar *et al.*, 2025). Thorat e Bhatt (2023) destacam que G2V pode causar sobrecarga e degradação da qualidade da energia, enquanto carregamento coordenado mitiga esses efeitos. Portanto, o V2G oferece serviços auxiliares, embora envolva desafios como degradação da bateria e custos de infraestrutura.

As estratégias de carregamento de veículos elétricos incluem modelos não controlados, que recarregam imediatamente, e controlados, que permitem ajustar horário, taxa de recarga e estado de carga. Bremermann (2014) propôs um modelo baseado no processo de Poisson para analisar a carga de veículos elétricos e padrões de mobilidade. Entre os controlados, destacam-se o carregamento no vale, incentivado por tarifas mais baixas, e o carregamento direto. Além disso, a estratégia V2G possibilita a injeção de energia na rede, aumentando a confiabilidade do sistema.

3.4 Integração com fontes de energia renováveis

A integração de VEs com fontes de energia renováveis também impacta a confiabilidade. Thapa *et al.* (2023) avaliaram sistemas elétricos com geração fotovoltaica (FV) e VEs, utilizando previsão de FV por *machine learning* e simulações Monte Carlo, observando que FV aumenta a confiabilidade, enquanto a penetração crescente de VEs tende a reduzi-la, especialmente sob limitação de transmissão, com a distribuição da carga de VEs sendo crítica em altas penetrações.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente integração de veículos elétricos (VEs) e fontes renováveis apresenta oportunidades significativas para a flexibilização da rede elétrica e a redução de emissões de

gases de efeito estufa. Entretanto, o aumento da demanda elétrica e a intermitência de fontes renováveis exigem planejamento cuidadoso e estratégias de operação eficientes para manter a confiabilidade e a estabilidade do sistema.

Estratégias como carregamento inteligente e o modo *vehicle-to-grid* (V2G) demonstram potencial para mitigar impactos, oferecendo flexibilidade à rede e serviços auxiliares sem comprometer a confiabilidade. A expansão da mobilidade elétrica, portanto, deve ser acompanhada de políticas, tecnologias e soluções coordenadas que garantam que os benefícios ambientais e energéticos sejam efetivos, ao mesmo tempo em que preservam a segurança e a confiabilidade dos sistemas elétricos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo apoio financeiro, à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelo suporte institucional, ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGES) e ao Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica (NTEEL) pelo apoio acadêmico, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte, que tornaram este trabalho possível.

REFERÊNCIAS

ACHARIGE, S. S. G. *et al.* Impacts of electric vehicle charging system on the distribution grid and remedial measures. **2024 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)**, [S.L.], p. 1-9, 20 out. 2024. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ias55788.2024.11023822>.

ARSLANOĞLU, İ.; BÜYÜK, M. Electric vehicle impacts on electric power system: a literature survey. **2025 7Th International Congress On Human-Computer Interaction, Optimization And Robotic Applications (Ichora)**, [S.L.], p. 1-7, 23 maio 2025. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ichora65333.2025.11017275>.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **PDE 2034**. 2024.

BREMERMANN, L. E. **Impact evaluation of the large scale integration of electric vehicles in the security of supply**. 2014. 240 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculty Of Engineering, University Of Porto, Porto, 2014.

DELGADO, F. *et al.* **Carros elétricos**. 7. ed. Rio de Janeiro: FGV Energia, 2017. 112 p.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas S. A., 2008. 220 p.

HELM, S. *et al.* Impact of unbalanced electric vehicle charging on low-voltage grids. **2020 IEEE Pes Innovative Smart Grid Technologies Europe (Isigt-Europe)**, [S.L.], p. 665-669, 26 out. 2020. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/isigt-europe47291.2020.9248754>.

IEA. **Global EV outlook 2024**. Paris: Licença: CC By 4.0, 2024. 174 p.

IEEE. **IEEE Std 493™ -2007**. New York: IEEE Recommended Practice For The Design Of Reliable Industrial And Commercial Power Systems, 2007.

KUMAR, P. *et al.* A comprehensive review of vehicle-to-grid integration in electric vehicles: powering the future. **Energy Conversion And Management: X**, [S.L.], v. 25, p. 100864, jan. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100864>.

KUTJUNS, A.; ZEMITE, L. Power network system reliability and methods of calculation. **2009 IEEE Bucharest Powertech**, [S.L.], p. 1-6, jun. 2009. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ptc.2009.5282066>.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas S. A., 2017. 375 p.

OMOYIWOLA, E.; DAVARI, M. Monte carlo-based reliability assessment for power systems with high penetration of photovoltaic systems from inverter-based resources. **Southeastcon 2025**, [S.L.], p. 1573-1578, 22 mar. 2025. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/southeastcon56624.2025.10971628>.

PANDIT, D.; NGUYEN, N. Reliability of electric vehicle integrated systems under battery-exchange and plug-in mode. **2023 IEEE Texas Power And Energy Conference (Tpec)**, [S.L.], p. 1-6, 13 fev. 2023. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/tpec56611.2023.10078710>.

SADEGHIAN, O. *et al.* Improving reliability of distribution networks using plug-in electric vehicles and demand response. **Journal Of Modern Power Systems And Clean Energy**, [S.L.], v. 7, n. 5, p. 1189-1199, 7 maio 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40565-019-0523-8>.

THAPA, J. *et al.* Composite power system reliability assessment considering uncertainty of electric vehicle charging and pv power generation. **2023 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (Ias)**, [S.L.], p. 1-7, 29 out. 2023. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ias54024.2023.10406627>.

THORAT, R.; BHATT, P. A comprehensive review on g2v,v2g and optimization techniques for grid integration of electric vehicles. **2023 IEEE 11Th Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-Htc)**, [S.L.], p. 402-407, 16 out. 2023. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/r10-htc57504.2023.10461852>.

IMPLEMENTAÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA POR MEIO DE UM *PODCAST* SOBRE PERMACULTURA

Patricia Abade Ferreira¹, Kátia Cilene Rodrigues Madruga², Mônica Knöpker³

Universidade Federal de Santa Catarina/Departamento de Energia e
Sustentabilidade/patriciaabade@yahoo.com.br

Universidade Federal de Santa Catarina/Departamento de Energia e Sustentabilidade/katia.madruga@ufsc.br
Instituto Federal de Santa Catarina/Departamento de Ensino, Pesquisa e
Extensão/monica.knopker@ifsc.edu.br

Resumo: O uso de energia sempre foi importante para o desenvolvimento humano, e hoje a demanda cresce com o avanço tecnológico. Medidas de eficiência energética (EE) e a transição para fontes limpas contribuem para mitigar essa demanda e alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Apesar da matriz brasileira ser 50% renovável, é necessário diversificar fontes e ampliar ações de EE. O Plano Nacional de Eficiência Energética propõe iniciativas como educação e divulgação científica, que têm mostrado bons resultados, inclusive com o uso de podcasts. Nesse contexto, a permacultura propõe uma abordagem integrada, promovendo o uso eficiente de energia e práticas sustentáveis em construção, habitação e gestão hídrica. Este estudo propõe e analisa as potencialidades e limitações de um podcast baseado na permacultura como ferramenta de apoio às políticas públicas de EE. A pesquisa, de natureza exploratória e abordagem qualitativa, envolveu revisão de literatura, produção e avaliação do podcast. Os resultados apontam limitações como a necessidade de definir o público-alvo, de realizar ajustes na edição e de abordar os problemas a partir de uma visão mais crítica. Já com relação às suas potencialidades, ressalta-se a capacidade do podcast ocupar espaços que vídeos e textos não alcançam, a integração dos temas abordados, isto é, permacultura, EE e políticas públicas, e os resumos ao final dos episódios. As sugestões tratam de traduzir termos em inglês, encurtar os episódios para escolas e trazer boas ideias como consultar redes de permacultura para identificar temas de interesse. Os ouvintes/avaliadores relataram compreender os conceitos apresentados no podcast, e conseguir pensar em ações de melhoria de EE aplicáveis ao seu cotidiano. Essa capacidade sugere que a mensagem principal do podcast 'Fótons e Folhas' pode ter sido compreendida, demonstrando potencial para auxiliar na implementação de políticas públicas de EE.

Palavras-chave: Políticas Públicas de Eficiência Energética. Educação. Divulgação científica. Permacultura. Podcast.

1 INTRODUÇÃO

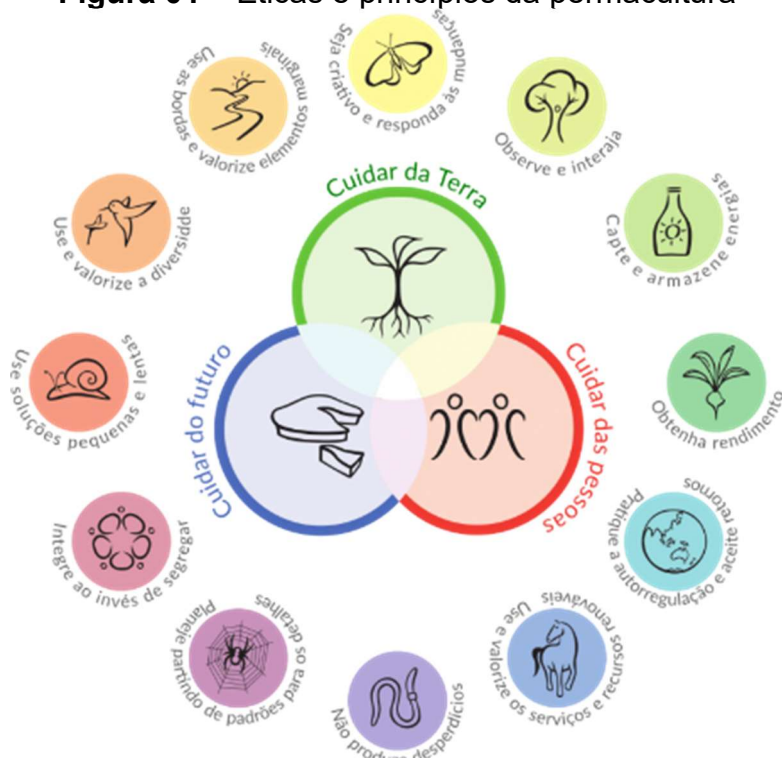
Ao longo de sua trajetória, a humanidade tem utilizado para o seu desenvolvimento as energias disponíveis de diferentes maneiras. Nos dias atuais, a demanda por energia está em constante crescimento, principalmente pelo avanço tecnológico, tanto em nível global quanto nacional. Nesse cenário, a eficiência energética (EE) e a transição para fontes mais limpas e renováveis são importantes, pois podem ajudar na otimização dos recursos já existentes e minimizar impactos ambientais e, em consequência disso, auxiliam no alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Embora o Brasil possua uma matriz energética 50% renovável, de acordo com o Balanço Energético Nacional 2025 (BEN 2025) (Brasil, 2025), ainda é necessário aumentar as renováveis e promover a EE para atender de forma sustentável às necessidades energéticas.

As políticas públicas de eficiência energética são mecanismos legais que podem auxiliar nesse intuito. Uma importante política desse tipo é o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf). Entre suas indicações são apontadas ações de educação e divulgação científica (DC) para estimular o uso racional da energia.

Pesquisas ligadas aos temas meio ambiente, produção limpa de energia e sua conservação chegaram a resultados promissores, observando mudanças de atitude em relação ao uso da energia. Nesse sentido, uma das formas de se educar é através da DC, como é o caso dos podcasts, tão populares na atualidade. Pode-se citar os podcasts Caçadores de Inclusão de Nazário (2022), que aborda acessibilidades nos Institutos Federais, e o Observatório Atômico de Soares (2023) que fala de ciência para alunos do ensino médio.

Um tema que trata sobre sustentabilidade e traz a EE imbricada em suas práticas é a permacultura. Na Figura 01 observa-se a flor da permacultura contendo as éticas (filosofias) ao centro e os doze princípios (práticas) num segundo âmbito.

Figura 01 – Éticas e princípios da permacultura



Fonte: Núcleo de estudos em Permacultura (2025).

A permacultura destaca-se por sua abordagem integrada, as três éticas falam das grandes necessidades de interação e cooperação com o planeta, como explica um dos criadores da permacultura David Holmgren (2020). Ela engloba ecologia, construção sustentável, planejamento dos espaços, gestão de recursos hídricos, prevenção de desastres e promoção de relações humanas equilibradas com o ambiente natural.

Levando isso em consideração, realizou-se uma investigação, com o objetivo de analisar potencialidades e limitações de um podcast, elaborado com base nos princípios da permacultura, no intuito de fomentar a implementação de políticas públicas de EE.

2 METODOLOGIA

A metodologia dessa pesquisa foi de caráter exploratório com abordagem qualitativa, e dividiu-se em três etapas: revisão da literatura, produção e avaliação do *podcast*.

Na revisão da literatura realizou-se uma pesquisa nas bases de dados CAPES, ScienceDirect, Scopus, Scielo e na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações, com uso das seguintes palavras chaves: política pública, eficiência energética, educação, divulgação científica, permacultura e *podcast*.

Sobre a produção do *podcast*, planejado inicialmente para ter treze episódios, optou-se nesta pesquisa de mestrado por produzir e avaliar apenas os três primeiros. Cada episódio foi construído partindo de uma pergunta-guia para fomentar a reflexão sobre a EE associada as três éticas da permacultura, quais sejam: cuidar da terra, cuidar das pessoas e cuidar do futuro. O episódio um introduziu as temáticas e os episódios dois e três focaram nos dois primeiros dos doze princípios da permacultura. As gravações foram feitas com uso de um aplicativo comum de celular, as edições no programa Audacity e a postagem em um grupo de plataformas digitais, entre elas o Spotify e o Youtube.

Por fim, para a avaliação do *podcast* foi realizada uma coleta de dados via e-mail e sua análise. O e-mail foi enviado para uma amostra de ouvintes da área educacional e continha links para um questionário com 15 perguntas e para os episódios do *podcast* postados no Spotify. Cabe esclarecer que a pesquisa foi aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisas com Seres Humanos da UFSC, sob o número de CAAE: 82953124.2.0000.0121, e que o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) foi aceito pelos participantes ao preencherem o questionário.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultados apresentam-se as potencialidades, limitações e sugestões citadas pelos ouvintes/avaliadores do *podcast* Fótons e Folhas.

As potencialidades citadas se resumem em ser inovador por se originar de uma pesquisa de um programa de pós-graduação, por ocupar espaços de DC que vídeos e textos não alcançam, por ter capacidade de crescimento e captação de patrocínios, por integrar temas como permacultura e EE, por explicar de forma clara as zonas da permacultura, pelos episódios serem dinâmicos e por apresentar um resumo dos pontos abordados no final de cada episódio. Essas potencialidades ressaltam a relevância do *podcast* e o alcance de um roteiro bem estruturado, sugerindo uma base sólida.

As limitações apontadas em geral se referiam mais aos pontos a serem aprimorados, do que a correções. Destaca-se definir o público-alvo, fazer ajustes na edição, buscar financiamento e outras ações para ampliar o alcance do *podcast* e realizar melhorias

em partes do roteiro, como, acrescentar visão crítica sobre o contexto social de alguns problemas (abordar as estruturas invisíveis) e reforçar que a permacultura não criou, mas incorporou dos saberes tradicionais o entendimento de que a natureza e o ser humano são partes integrantes de um mesmo todo. Visto que, nem todas as culturas tratam a natureza como um recurso, como bem lembra Descola (2016).

As sugestões trazem questões organizacionais e didáticas, como traduzir termos em inglês, encurtar os episódios para escolas e retomar os princípios da permacultura após as explicações. Além disso, sugerem ideias como consultar redes de permacultura para identificar temas de interesse, e reforçam a importância de incentivar a visão crítica dos problemas.

Apesar das questões a serem aprimoradas identificadas, os ouvintes/avaliadores relataram compreender os conceitos apresentados no podcast, e conseguir pensar em ações de melhoria de EE aplicáveis ao seu cotidiano.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visando alcançar o objetivo proposto, analisar potencialidades e limitações de um podcast, elaborado com base nos princípios da permacultura, no intuito de fomentar a implementação de políticas públicas de EE, foi realizada uma pesquisa de natureza exploratória e abordagem qualitativa em três etapas: revisão bibliográfica, produção e avaliação do podcast Fótons e Folhas. A revisão abordou os temas políticas públicas, EE, educação, DC, podcasts e permacultura. A produção envolveu a criação de roteiros, a gravação e a edição de três episódios. A avaliação revelou limitações como a necessidade de definir o público-alvo, realizar ajustes na edição e abordar os problemas com visão mais crítica. As potencialidades incluem a capacidade do podcast ocupar espaços que vídeos e textos não alcançam, a integração dos temas abordados, isto é, permacultura, EE e políticas públicas, e os resumos ao final dos episódios. As sugestões envolvem traduzir termos em inglês, encurtar os episódios para escolas e consultar redes de permacultura para identificar temas de interesse. O podcast demonstrou potencial para engajar diferentes públicos e estimular ações práticas relacionadas à EE e à permacultura. Futuras pesquisas podem revisar e, ou finalizar os episódios restantes, avaliar o alcance com outras métricas e explorar temas sugeridos por comunidades permaculturais.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, através da bolsa de mestrado durante sua realização.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional (BEN 2025)**. Brasília: MME/EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025> . Acesso em: 28 set. 2025.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf)**. Brasília, MME/EPE. 2011. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/setores-e-subsistemas/publicacoes/plano-nacional-de-eficiencia-energetica/documentos/plano-nacional-eficiencia-energetica-pdf.pdf/view> . Acesso em: 28 set. 2025.
- DESCOLA, P. **Outras Naturezas, Outras Culturas**. Tradução de Cecília Piscato. São Paulo: Editora 34, 2016.
- HOLMGREN, D. **Essence of Permaculture**. Melliodora Publishing, 2020, 1ª edição. *E-book*. ASIN: B08FL8D7VT. ISBN-10: 0648344231. ISBN-13: 978-0648344230
- NAZÁRIO, K.G. **Educação Profissional Inclusiva: O Podcast como recurso educacional e disseminação de práticas inclusivas**. 2022. Dissertação (Mestrado Profissional em Educação Profissional e Tecnológica em Rede Nacional) - Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). Câmpus Florianópolis, Florianópolis, 2022. Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.xhtml?popup=true&id_trabalho=11754214 . Acesso em: 29 set. de 2025.
- SOARES, H. L. B. N. **Podcast como instrumento de divulgação científica**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências da Natureza) - Universidade Federal Fluminense (UFF) Campus Niterói. Niterói, 2023. Disponível em: https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/29471/Disserta%20a7%20a3o_%20Final_Haron%20Lucas%20Barbosa%20Negri%20Soares.pdf?sequence=1&isAllowed=y . Acesso em: 29 set. de 2025.

PESQUISA RÁPIDA SOBRE O TEMA ENERGIA RENOVÁVEL E EDUCAÇÃO UTILIZANDO FERRAMENTA DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Alesandra Bez Birolo¹, Carla Abreu D'Aquino²

¹ Universidade Federal de Santa Catarina/ Departamento de Energia e Sustentabilidade/Programa de Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGES)/alesandra.birolo@posgrad.ufsc.br

² Universidade Federal de Santa Catarina/ Departamento de Energia e Sustentabilidade/Programa de Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade/carla.daquino@ufsc.br

Resumo: *Este trabalho sintetiza uma busca rápida de artigos utilizando uma ferramenta de inteligência artificial, com os recentes sobre a interseção entre educação para o desenvolvimento sustentável (EDS) e o ensino de energias renováveis, com base em 18 estudos identificados por meio da plataforma Elicit. A análise abrange contextos educacionais diversos, do ensino fundamental ao superior, e regiões como Europa, América Latina, Ásia e América do Norte. O objetivo foi mapear abordagens curriculares, métodos pedagógicos, resultados de aprendizagem e desafios institucionais. A metodologia adotada foi uma revisão integrativa, com foco em dados de relatórios gerados por inteligência artificial a partir de pesquisas semânticas em mais de 126 milhões de artigos acadêmicos. Os principais resultados indicam que currículos interdisciplinares, contextualizados e com ênfase em aprendizagem ativa são eficazes para promover a alfabetização em sustentabilidade e energias renováveis. Além disso, quatro estudos vinculam explicitamente suas propostas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 4, 7 e 13. Contudo, persistem desafios estruturais, como a falta de currículos estruturados, a deficiência de formação docente e o desalinhamento entre o ensino superior e as demandas do setor energético. Conclui-se que a integração eficaz desses temas exige políticas educacionais intersetoriais, investimento em recursos didáticos adaptados e valorização de abordagens pedagógicas críticas e sistêmicas.*

Palavras-chave: *Educação para o Desenvolvimento Sustentável; Energias Renováveis; Aprendizagem Ativa; Inteligência Artificial; ODS.*

1 INTRODUÇÃO

O volume exponencial de publicações científicas tem tornado cada vez mais complexo o processo de revisão sistemática da literatura, etapa essencial em qualquer investigação científica rigorosa, especialmente em áreas interdisciplinares, a exemplo da interseção entre energia renovável e educação (Altomonte, S.; Rutherford, P.; Wilson, R. 2014). A transição energética global exige não apenas inovações tecnológicas, mas também uma transformação profunda nos sistemas educacionais (Desha, C.; Hargroves, K. 2025). Diante desse desafio, as ferramentas baseadas em inteligência artificial ganharam destaque por sua capacidade de automatizar tarefas cognitivas intensivas, como triagem, seleção e as evidências.

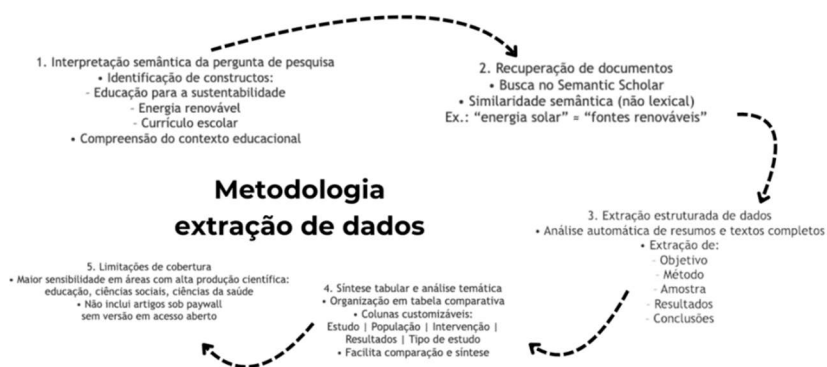
Entre esses recursos, o *Elicit.org*, criado pela organização *Ought*, sobressai-se por combinar acesso a vastas bases de dados acadêmicos com modelos de linguagem de grande porte, possibilitando a condensação de artigos, a extração de dados significativos, a síntese de diversas fontes e a filtragem de estudos com características temáticas específicas (ELICIT, 2025). É uma ferramenta poderosa para quem já entende o método de revisão integrativa e quer otimizar o tempo, reduzir erros manuais e aumentar a profundidade da análise, mas nunca substitui o pensamento crítico, a interpretação contextual e a construção teórica que são essenciais nesse tipo de revisão (Ammar, 2018).

Este artigo propõe-se a examinar as funcionalidades, fontes de dados, vantagens e limitações do Elicit, configurando-se como um guia metodológico voltado a pesquisadores, docentes e estudantes de pós-graduação engajados na interface entre sustentabilidade energética e práticas educacionais. Para ilustrar sua aplicação, realizou-se uma busca exploratória utilizando duas estratégias de consulta: a primeira com os termos “educação para sustentabilidade” e “energia renovável”; a segunda com a combinação booleana (“educação” OU “educação para a sustentabilidade” OU “educação para o desenvolvimento sustentável”) E “energias renováveis”, restringindo-se a publicações de 2025. A ferramenta processou mais de 126 milhões de documentos acadêmicos do repositório Semantic Scholar, retornando os 50 artigos mais relevantes, dos quais 18 foram selecionados para análise. Ressalta-se, contudo, a necessidade de cautela quanto à veracidade das respostas geradas automaticamente e aos riscos associados à dependência excessiva de tecnologias automatizadas, reafirmando-se a indispensabilidade do julgamento crítico e da reflexão epistemológica por parte do pesquisador na condução de revisões bibliográficas rigorosas.

2 METODOLOGIA

A busca pelos artigos foi realizada com apoio da plataforma ELICIT (<https://elicit.org/>), ferramenta baseada em inteligência artificial que combina indexação de metadados acadêmicos (via *Semantic Scholar*) e modelos de linguagem de grande escala, como os da família GPT. As buscas utilizaram os termos: “Educação para a sustentabilidade AND energia renovável” e “Educação OR educação para a sustentabilidade OR educação para o desenvolvimento sustentável AND Energia Renovável”. O acesso foi feito via cadastro de e-mail, e a pergunta de pesquisa foi inserida no painel da plataforma para acionar o fluxo automatizado de análise. A ELICIT opera em cinco etapas sequenciais, conforme a Figura 1.

Figura 1. Fluxograma automatizado da metodologia.



Fonte: Autoras (2025).

Foram incluídos estudos publicados entre 2010 e 2024, em português, inglês ou espanhol, que abordavam explicitamente, documentos curriculares oficiais como: a BNCC, diretrizes nacionais, matrizes curriculares; práticas pedagógicas ou propostas didáticas relacionadas à sustentabilidade e/ou energia renovável no ensino fundamental ou médio. Foram excluídos: artigos de opinião, editoriais, estudos não empíricos sem análise curricular, e aqueles cujo texto completo não estava acessível em versão aberta. Embora o ELICIT tenha auxiliado na triagem inicial e na seleção de dados, todos os 18 artigos selecionados foram submetidos a uma avaliação, com base nos critérios de rigor metodológico temático e relevância (Whittemore; Knafl, 2005).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Elicit não funciona como um repositório independente de artigos científicos. Em vez disso, sua infraestrutura de dados baseia-se principalmente no *Semantic Scholar*, uma base acadêmica mantida pelo *Allen Institute* para AI, que indexa milhões de publicações de diversas áreas do conhecimento. Além do *Semantic Scholar*, o *Elicit* pode acessar outras fontes públicas, como PubMed e repositórios de versões pré-impressas, resumos gratuitos, desde que os conteúdos estejam disponíveis em acesso aberto. A plataforma utiliza metadados estruturados, incluindo título, autores, resumo(*abstract*), DOI, referências, referências e campos temáticos, como base para suas operações de busca e retenção. Dos 18 artigos selecionados, a ferramenta organizou tabelas para as análises e separou por critérios, os temas dos artigos.

Os estudos desenvolvidos revelam uma forte tendência à interdisciplinaridade, com integração de STEM/STEAM, ciências sociais, geografia e artes (Hoque et al., 2022; Indahwati et al., 2023; Solarz et al., 2022.) Abordagens como aprendizagem baseada em projetos, experimentação prática e uso de simulações digitais aparecem em 12 dos 18 estudos como

estratégias eficazes para aumentar motivação, pensamento crítico e atitudes sustentáveis (Gilmour, 2022; Loza Pedrozo et al., 2024). Quatro estudos vinculam explicitamente suas propostas aos ODS, destacando a contribuição da educação energética para os ODS 4 (Educação de Qualidade), 7 (Energia Acessível e Limpa) e 13 (Ação Climática).

Contudo, os desafios persistentes foram identificados: (1) falta de currículos estruturados em energias renováveis, especialmente no ensino básico (Hoque et al., 2022); (2) formação insuficiente de professores (Fang et al., 2021); (3) desalinhamento entre ensino superior e mercado de trabalho em energias renováveis, com predominância de conteúdos fossilizados (Vakulchuk e Overland, 2024); e (4) limitações de recursos em contextos de baixa renda. Esses achados reforçam que a eficácia das práticas pedagógicas depende de apoio institucional, de infraestrutura e de políticas públicas consistentes.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O *Elicit.org* representa um avanço significativo na interseção entre inteligência artificial e pesquisa acadêmica. Ao integrar bases de dados científicas consolidadas com modelos de linguagem avançados, a plataforma oferece uma interface intuitiva e poderosa para a exploração da literatura. Embora não substitua o julgamento crítico humano, o *Elicit* atua como um assistente cognitivo eficaz, democratizando o acesso à síntese de evidências e potencializando a produtividade de pesquisadores em diversas áreas do conhecimento.

A educação em energias renováveis deve ser entendida como um espaço de formação cidadã, não apenas técnica. As evidências apontam que abordagens contextualizadas, interdisciplinares e baseadas em experiências práticas são capazes de desenvolver competências essenciais para a transição socioecológica.

No entanto, para que essas iniciativas tenham impacto sistêmico, é necessário: (1) integrar energias renováveis aos currículos nacionais; (2) investir na formação continuada de professores; (3) fortalecimento de parcerias entre universidades, escolas e setor energético; e (4) ampliar pesquisas empíricas em contextos do Sul Global. A busca por similaridade semântica e não apenas correspondência lexical, revelou-se crucial para mapear essa complexa interseção de forma abrangente e significativa.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ALTOMONTE, S.; RUTHERFORD, P.; WILSON, R. Mapping the way forward: education for sustainability in architecture and urban design. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, v. 21, n. 3, p. 143–154, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/csr.1311>.
- AMMAR, W. et al. Construction of the literature graph in Semantic Scholar. In: *Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, New Orleans, Louisiana, 2018. p. 84–91. DOI:
- BIANCARDI, A.; COLASANTE, A.; D'ADAMO, I. Sustainable education and youth confidence as pillars of future civil society. *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28143-9>.
- DESHA, C.; HARGROVES, K. Informing engineering education for sustainable development using a deliberative dynamic model for curriculum renewal. [S. l.: s. n.], 2011.
- ELICIT. Disponível em: https://elicit.com/?spm=a2ty_o01.29997173.0.0.4eebc921RgM1tJ. Acesso em: 25 set. 2025.
- FANG, T. P. et al. How Ready is Renewable Energy? A Review Paper on Educational Materials and Reports Available for the Teaching of Hydrogen Fuel Cells in Schools. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 1–11, 2021. DOI: 10.25046/aj060201.
- GILMOUR, B. An award winning approach to education relating to renewable energies. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT FRIENDLY ENERGIES AND APPLICATIONS*, 7., 2022, [S. l.]. *Proceedings...* [S. l.]: IEEE, 2022. p. 1–5. DOI: 10.1109/efea56675.2022.10063830.
- HOQUE, F.; YASIN, R. M.; SOPIAN, K. Revisiting Education for Sustainable Development: Methods to Inspire Secondary School Students toward Renewable Energy. *Sustainability*, Basel, v. 14, n. 14, p. 8296, 2022. DOI: 10.3390/su14148296.
- INDAHWATI, S. D. et al. Integration of independent learning and physics innovation in STEAM-based renewable energy education to improve critical thinking skills in the era of Society 5.0 for Sustainable Development Goals (SDGs) 2030. *E3S Web of Conferences*, [S. l.], v. 450, p. 01010, 2023. DOI: 10.1051/e3sconf/202345001010.
- LOZA PEDROZO, S.; TORRES FARFÁN, C. A.; VALDERRAMA, D. A. Física y Educación Ambiental; encuentros posibles para la transición energética. *Avances Investigación en Ingeniería*, [S. l.], v. 21, n. 1 (Enero-Junio), 2024. DOI: 10.18041/1794-4953/avances.1.11553.
- O'MARA-EVES et al.: Using text mining for study identification in systematic reviews: a systematic review of current approaches. *Systematic Reviews* 2015 4:5. Acesso em: 5/09/2025. <https://systematicreviewsjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/2046-4053-4-5#citeas>
- SOLARZ, J. et al. Trends in Energy Security Education with a Focus on Renewable and Nonrenewable Sources. *Energies*, Basel, v. 15, n. 4, p. 1351, 2022. DOI: 10.3390/en15041351.
- WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. A revisão integrativa: metodologia atualizada. *Journal of Advanced Nursing*, v. 52, n. 5, p. 546–553, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2005.03621.x>
- VAKULCHUK, R.; OVERLAND, I. The failure to decarbonize the global energy education system: carbon lock-in and stranded skill sets. *Energy Research & Social Science*, [S. l.], v. 110, p. 103446, 2024. DOI: 10.1016/j.erss.2024.103446.

A FOTO(ELETRO)CATÁLISE DO GLICEROL NA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE: UMA REVISÃO

Jéssika Sumariva Saturno¹, Elaine Virmond², Elise Sommer Watzko³

^{1,2,3} Universidade Federal de Santa Catarina/E-mail: jessikasumarivasaturno@gmail.com; elaine.virmond@ufsc.br; elise.sommer@ufsc.br

Resumo: O glicerol é um subproduto da produção de biodiesel e tem se destacado por sua abundância, versatilidade e baixo valor de mercado. Sua oxidação em sistemas de foto(eletro)catálise tem ganhado atenção significativa por sua capacidade de produzir produtos químicos de alto valor agregado, gerando hidrogênio simultaneamente. Este estudo teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica das publicações dos últimos 5 anos na base de dados Web of Science, no qual se escolheu 7 artigos experimentais a fim de analisar as abordagens recentes sobre o tema. Os resultados analisados demonstram que a adição de dopagem, heterojunções e co-catalisadores nas propriedades eletrônicas do fotocatalisador vem sendo utilizadas como forma de acelerar a cinética da oxidação do glicerol resultando em maior geração de H₂. Vem ganhando destaque o bismuto em sua forma de óxidos e vanadatos, uma vez que apresentam vantagens em relação a outros tipos de semicondutores. Além disso, a separação fotoeletroquímica oferece um caminho sustentável para a produção limpa de hidrogênio, integrando a valorização de resíduos e contribuindo para avanços em direção a uma economia mais sustentável e de baixo carbono.

Palavras-chave: Hidrogênio, Glicerol, Foto(eletro)catálise, Dopagem, Sustentabilidade

1 INTRODUÇÃO

A oxidação foto(eletro)catalítica (PEC) do glicerol tem se tornado uma tecnologia inovadora e sustentável para a valorização de biomassa e geração de hidrogênio. Esse sistema integra os princípios de eletrocatálise (EC) e da fotocatálise (PC) em uma única célula, por meio do uso de fotoeletrodos semicondutores que permitem melhorar a eficiência dos processos eletroquímicos e otimizar a conversão energética.

O glicerol, resíduo de origem renovável, constitui um subproduto da produção de biodiesel que ainda não tem sido aproveitado de forma otimizada. Sua ampla disponibilidade, devido a baixa demanda no mercado, fez com que seu preço fosse significativamente reduzido (KIM *et al.*, 2025).

Nesse contexto, o glicerol tem se destacado como reagente alternativo à água na produção de hidrogênio, já que em comparação a água, o glicerol apresenta vantagens termodinâmicas e cinéticas, uma vez que sua oxidação demanda menor aporte energético e ocorre de forma mais favorável a oxidação (YU *et al.*, 2024).

Dessa forma, o objetivo desse trabalho é realizar uma revisão bibliográfica afim de obter uma visão geral atual sobre o tema da fotoeletrocatálise, seus conceitos e contribuições para a produção de hidrogênio verde.

2 METODOLOGIA

Esse trabalho foi elaborado a partir de uma revisão bibliográfica realizada por meio de uma busca sistemática de artigos científicos coletados na base: Web of Science. A análise

foi conduzida por meio de buscas por palavras-chave: (“hydrogen production” OR “hydrogen evolution”) AND (“photocatalytic” OR “photoreform” OR “photocatalytic reforming”) AND “glycerol”. Foram considerados trabalhos de 2020 a 2025, totalizando 40 artigos. Entretanto, seguindo os critérios de inclusão, foram selecionados 7 artigos para análise aprofundada por apresentarem informações relevantes para o tema.

Os critérios de inclusão adotados envolveram: (1) tipo de estudo (artigos experimentais); (2) estudos onde o glicerol é utilizado como agente de sacrifício; (3) apresentem síntese e caracterizações de materiais/eletrodos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na revisão bibliográfica apresentada na Tabela 1, são comparados 7 artigos de foto(eleto)catálise para a produção de hidrogênio e produtos de maior valor agregado. Dentre os semicondutores utilizados atualmente, os óxidos e compostos de bismuto tem sido bastante utilizado para funcionalizar eletrodos em foto(eleto)catálise.

Em comum em todos os artigos, observa-se as realizações de heterojunções, dopagens ou adição de co-catalisadores nas propriedades eletrônicas do fotocatalisador como forma de acelerar a cinética da oxidação do glicerol, aumentar a absorção de luz em regiões visíveis e gerar lacunas extras para reagir com espécies -OH, como o glicerol.

Dentre os artigos, dois empregaram a dopagem com Fe (ferro) como estratégia para aumentar a atividade catalítica, o que resultou em maior geração de H₂. O estudo de Kim et al. (2025) revela que a heteroestrutura ZnS/ZnO facilitou a migração de transportadores fotogerados para o glicerol adsorvido, aumentando a cinética de oxidação e promovendo a decomposição da biomassa.

Em relação aos produtos, o hidrogênio foi gerado em todos os estudos, porém nem todos trazem o quantitativo produzido. Também se destaca a produção de gliceraldeído (GLAD) e di-hidroxiacetona (DHA) como produtos de valor agregado do tipo C3.

Tabela 01 – Comparativo dos artigos selecionados.

Autores	Eletrodos produzidos	Métodos de síntese	Produtos produzidos	Contribuições dos estudos
Kim et al. (2025)	ZnS/ZnO dopado com Fe	Hidrotérmico/sulfidização	Ácido glicérico (GA) e H ₂	Mostrou o papel positivo da dopagem com Fe em reduzir a recombinação

eletrônica e a oxidação do glicerol				
Gong et al. (2025)	BiVO ₄ /NiOOH	Eletrodeposição / conversão térmica	Gliceraldeído (GLAD) e 1,3-dihidroxiaceto na (DHA) e H ₂	O catalisador utilizado acelerou a cinética da oxidação do glicerol e reduziu a recombinação de cargas no BiVO ₄
Santoso et al. (2023)	Fe-TiO ₂	Anodização eletroquímica/deposição	H ₂ – 202.9 mmol.m ⁻² .h ⁻¹	A dopagem com Fe permitiu absorver mais radiação visível e reduziu a recombinação
Yu et al. (2023)	WO ₃	Hidrotérmico/pulverização	(GLAD), (DHA) e H ₂ – 44 mmol.m ⁻² .h ⁻¹	O catalisador permitiu maior seletividade e redução do consumo energético
Nascimento et al. (2022)	Bi ₂ WO ₆	Hidrotérmico/doctor blade	Ácido fórmico (FA) e H ₂ – 197 mmol.m ⁻² .h ⁻¹	O pH do eletrólito influencia na eficiência de evolução de H ₂ , sendo a maior eficiência de 100% em pH 6
Bora et al. (2021)	Mo-BiVO ₄	Dip-coating/tratamento térmico	(GLAD), (DHA) e H ₂	A dopagem com Mo melhorou a oxidação do glicerol e aumento da densidade de corrente
Wu et al. (2021)	W-BiWO ₄	Eletrodeposição	(GLAD), (DHA), (FA) e H ₂	A junção de dopagem + co-catalisador acelerou a cinética da reação e obteve-se maior densidade de fotocorrente

Fonte: Autora.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A reforma do glicerol faz-se importante tanto pela possibilidade de se obter H_2 junto a compostos de elevado valor agregado, quanto pelo apelo ambiental e a redução do excedente desse subproduto da indústria de biodiesel. A literatura recente evidencia que modificações em semicondutores, como a dopagem, a formação de heterojunções e o uso de co-catalisadores, aumenta a eficiência e a seletividade das reações, principalmente quando usados óxidos e vanadatos de bismuto. Nesse contexto, a foto(eleto)catálise vem ganhando notoriedade pois permite a coprodução de energia limpa e a valorização de resíduos, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade e da economia circular.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo (processo 88887.144251/2025-00).

REFERÊNCIAS

KIM, Seungkyu; JUNG, Yoonsung; SO, Soonsung; KIM, Yunseul; SEO, Sehun; PARK, Jun-Cheol; KIM, Dong-Yu; LEE, Joo-Hyoung; LEE, Sanghan. Enhanced photoelectrochemical glycerol oxidation and hydrogen production using Fe-doped ZnS/ZnO nanowire heterostructures. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 127, p. 384-393, maio 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.174>.

YU, Jie; GONZÁLEZ-COBOS, Jesús; DAPPOZZE, Frederic; LÓPEZ-TENLLADO, Francisco J.; HIDALGO-CARRILLO, Jesús; MARINAS, Alberto; VERNOUX, Philippe; CARAVACA, Angel; GUILLARD, Chantal. WO₃-based materials for photoelectrocatalytic glycerol upgrading into glyceraldehyde: unravelling the synergistic photo- and electro-catalytic effects. **Applied Catalysis B: Environmental**, [S.L.], v. 318, p. 121843, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121843>.

GONG, Haomin; TIAN, Rufeng; NIU, Lu; SUN, Yan; ZHANG, Wanggang; WEI, Aili; WANG, Jian; LIU, Yiming. Photoelectrocatalytic highly selective oxidation of glycerol to C₃ products on Mo: bivo₄/niooh photoanodes. **Journal Of Electroanalytical Chemistry**, [S.L.], v. 982, p. 119019, abr. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jelechem.2025.119019>.

SANTOSO, Calvin; RATNAWATI; SLAMET. Utilization of glycerol solution for hydrogen production by a combination of photocatalysis and electrolysis processes with Fe-TiO₂ nanotubes. **Communications In Science And Technology**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 208-215, 31 dez. 2023. Komunitas Ilmuwan dan Profesional Muslim Indonesia (KIPMI). <http://dx.doi.org/10.21924/cst.8.2.2023.1280>.

YU, Jie; GONZÁLEZ-COBOS, Jesús; DAPPOZZE, Frederic; GRIMALDOS-OSORIO, Nicolas; VERNOUX, Philippe; CARAVACA, Angel; GUILLARD, Chantal. First PEM photoelectrolyser for the simultaneous selective glycerol valorization into value-added chemicals and hydrogen generation. **Applied Catalysis B: Environmental**, [S.L.], v. 327, p. 122465, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.122465>.

NASCIMENTO, Lucas L.; MARINHO, Juliane Z.; SANTOS, Allyson Leandro R. dos; FARIA, Anízio M. de; SOUZA, Rafael A.C.; WANG, Chuanyi; PATROCINIO, Antonio Otavio T.. Photoelectrochemical reforming of glycerol by Bi₂WO₆ photoanodes: role of the electrolyte pH on the H₂ evolution efficiency and product selectivity. **Applied Catalysis A: General**, [S.L.], v. 646, p. 118867, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcata.2022.118867>.

BORA, Debajeet K.; NADJAFI, Manouchehr; ARMUTLULU, Andac; HOSSEINI, Davood; CASTRO-FERNÁNDEZ, Pedro; TOTH, Rita. Photoelectrochemical glycerol oxidation on Mo-BiVO₄ photoanodes shows high photocharging current density and enhanced H₂ evolution. **Energy Advances**, [S.L.], v. 1, n. 10, p. 715-728, 2022. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/d2ya00077f>.

WU, Yi-Hsuan; KUZNETSOV, Denis A.; PFLUG, Nicholas C.; FEDOROV, Alexey; MÜLLER, Christoph R.. Solar-driven valorisation of glycerol on BiVO₄ photoanodes: effect of co-catalyst and reaction media on reaction selectivity. **Journal Of Materials Chemistry A**, [S.L.], v. 9, n. 10, p. 6252-6260, 2021. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/d0ta10480a>.

YANG, Xilong; LUO, Yadan; XUE, Jiayue; YANG, Zelin; FENG, Tianxu; SHAN, Wei; ZHANG, Hongwen; TANG, Hua. Photoelectrochemical glycerol oxidation to high value-added products over BiVO₄/CuWO₄ heterojunction photoanodes. **Journal Of Colloid And Interface Science**, [S.L.], v. 688, p. 317-327, jun. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2025.02.148>.

DESEMPENHO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO COM ARRANJOS EM DIFERENTES ORIENTAÇÕES: ANÁLISE A PARTIR DE DADOS REAIS DE OPERAÇÃO

Letícia Toreti Scarabelot¹, Hélen Farias Fávaro², Giuliano Arns Rampinelli³

¹ Universidade Federal de Santa Catarina / leticiascarabelot@yahoo.com.br

² Universidade Federal de Santa Catarina / helenfavar.15@gmail.com

³ Universidade Federal de Santa Catarina / giuliano.rampinelli@ufsc.br

Resumo: Este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de sistemas fotovoltaicos (FV) instalados com diferentes orientações (Leste e Oeste), por meio da análise de dados reais de geração ao longo de 12 meses. O sistema monitorado está localizado em Jacinto Machado (SC) e é composto por 20 módulos monocristalinos de 575 Wp, distribuídos igualmente entre as duas orientações e operando com inversores independentes. A metodologia consistiu no monitoramento contínuo da geração elétrica e no cálculo da produtividade em kWh/kWp, além da comparação com dados simulados obtidos no software PV*SOL. Os resultados demonstraram que a orientação Leste apresentou maior produtividade anual média (102 kWh/kWp), superando a orientação Oeste (94 kWh/kWp), especialmente nos meses de maior irradiação solar. Essa diferença pode ser atribuída a fatores climáticos locais e à influência da temperatura de operação dos módulos, que tende a ser mais elevada nas tardes, reduzindo a eficiência dos sistemas voltados para Oeste. Em meses com menor incidência solar, o sistema Oeste apresentou desempenho ligeiramente superior. A diferença média entre os valores simulados e os dados reais foi de 5,92%, indicando boa correlação entre ambos. Conclui-se que a escolha da orientação ideal depende das características climáticas regionais, reforçando a importância de análises técnicas específicas para cada local de instalação. Os dados obtidos contribuem para decisões mais embasadas no dimensionamento de sistemas FV em ambientes urbanos com restrições arquitetônicas.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos, Produtividade, Orientação Solar

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos (FV) têm se consolidado como alternativa sustentável e viável para geração de energia elétrica diante da crescente demanda por fontes renováveis. Para que operem com máxima eficiência, é fundamental considerar variáveis locais que influenciam seu desempenho, como radiação solar, temperatura ambiente, nebulosidade, orientação e inclinação das superfícies, além de aspectos técnicos e geográficos específicos do local de instalação (Gasparin e Krenzinger, 2017).

O desempenho de um sistema FV depende da radiação incidente, temperatura de operação, rendimento dos inversores e perdas elétricas por cabos, conexões e sujeira, além da degradação dos componentes ao longo do tempo. Entre os fatores mais relevantes no dimensionamento está a definição da orientação e inclinação dos módulos, que impactam significativamente a geração anual de energia (Gasparin e Krenzinger, 2017).

Simulações computacionais são amplamente utilizadas no projeto para estimar o desempenho em diferentes configurações. Essas ferramentas fornecem dados sobre módulos, inversores e condições climáticas, possibilitando análises técnicas e econômicas preliminares (Rampinelli e Machado, 2021). No entanto, as simulações nem sempre refletem com precisão o comportamento real dos sistemas, devido às particularidades regionais.

A orientação ideal para maximizar a captação solar no hemisfério sul é voltada para o norte, com inclinação próxima à latitude local (Burger e Ruther, 2006). Contudo, em sistemas integrados à arquitetura, especialmente em telhados com múltiplas águas, essa configuração nem sempre é viável. Assim, é necessária a análise do impacto de diferentes orientações no desempenho real (Zomer et al., 2014). Em edificações urbanas, a definição da orientação e inclinação deve ser cuidadosamente planejada desde as fases iniciais do projeto, pois influencia a eficiência ao longo da vida útil do sistema (Pinho e Galdino, 2014).

Neste contexto, este artigo apresenta uma análise baseada em dados reais e simulados de operação de um sistema fotovoltaico instalado com dois arranjos em diferentes orientações. O objetivo é avaliar o desempenho sob distintas condições de instalação, identificando quais configurações apresentam melhores resultados em termos de geração de energia elétrica. A partir dessa abordagem prática, busca-se contribuir para o entendimento do comportamento dos sistemas em campo e oferecer subsídios técnicos para a tomada de decisão em futuros projetos, especialmente em contextos urbanos e arquitetonicamente restritos.

2 METODOLOGIA

Para avaliar o desempenho do sistema FV, foram utilizados dados de um sistema fotovoltaico conectado à rede, instalado sobre uma cobertura de telhado na cidade de Jacinto Machado, em Santa Catarina. O sistema FV é composto por 20 módulos FV de silício monocristalino com potência nominal de 575 Wp, sendo 10 módulos instalados na parte Leste do telhado e 10 módulos instalados na parte Oeste, cada orientação possui um inversor de 5 kW. O período de monitoramento compreendeu 12 meses. A aquisição de dados de geração de energia elétrica foi realizada pela plataforma integrada aos inversores.

A produtividade é um índice de mérito técnico que será utilizado para analisar diferentes sistemas FV. Este índice pode ser determinado em diferentes bases de tempo e pode ser calculado pela Eq. (1).

$$Y_F = \frac{1}{P_{STC}} \int_0^{\Gamma} P_{CA}(t) dt \quad (1)$$

na qual, P_{STC} é a potência nominal nas condições padrão de teste (STC) de 1000 W/m², (Γ é o período analisado e P_{CA} é a potência elétrica efetivamente convertida pelo sistema FV em operação (DAVI e colab., 2016).

Para a simulação do sistema fotovoltaico, foi utilizado o software PV*SOL, desenvolvido pela Valentin Software GmbH (Alemanha). O programa considera variáveis

como condições climáticas locais, ângulos de inclinação e azimute, características dos módulos fotovoltaicos, sombreamento e obstáculos. Os dados climáticos foram obtidos a partir da base Meteonorm 7.2(i)c3, com resolução horária. Os modelos utilizados para estimar a irradiação difusa foram Hofmann (plano horizontal) e Hay & Davies (plano inclinado).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

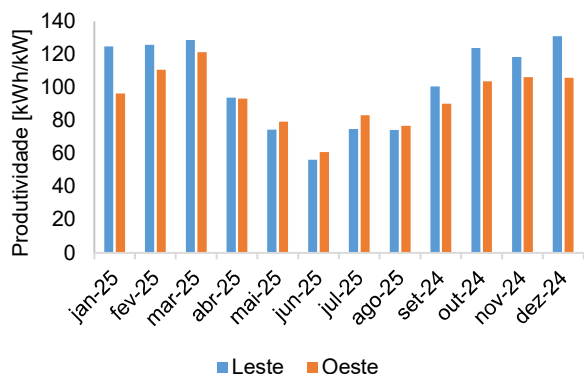
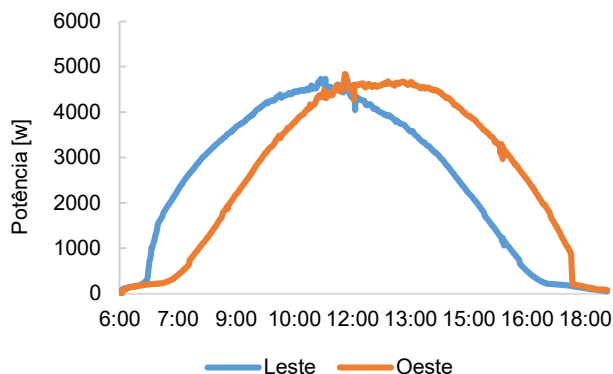
Considerando o sistema FV completo, a geração de energia elétrica foi monitorada ao longo de 12 meses, considerando a geração total do período, a diferença percentual entre a geração real e a simulada foi de 5,92%, conforme Tabela 1. O mês de abril apresentou a menor diferença percentual, com 0,79% e o mês de janeiro apresentou a maior, com 25,75%.

Tabela 01 – Geração de energia elétrica real e simulada.

Mês	Geração real [kWh]	Geração simulada [kWh]	Mês	Geração real [kWh]	Geração simulada [kWh]
Jan/25	1272	1600	Jul/25	908	809
Fev/25	1359	1336	Ago/25	869	939
Mar/25	1438	1295	Set/24	1097	1040
Abr/25	1076	1067	Out/24	1308	1433
Mai/25	884	896	Nov/24	1292	1617
Jun/25	675	734	Dez/24	1363	1617
Média				1128	1199

Fonte: Os autores

Com base no monitoramento individual dos inversores ao longo de 12 meses de operação, Figura 2, observou-se que a produtividade média do sistema fotovoltaico orientado para o leste foi de 102 kWh/kWp, enquanto o sistema voltado para o oeste apresentou uma média de 94 kWh/kWp. As maiores diferenças de desempenho entre os sistemas ocorreram nos meses de maior incidência solar, com destaque para janeiro, quando o sistema leste superou o oeste em até 28,47 kWh/kWp. Por outro lado, durante o período de menor irradiação, entre os meses de maio e agosto, o sistema oeste apresentou desempenho ligeiramente superior, com uma diferença máxima de 8,30 kWh/kWp.

Figura 02 – Produtividade Leste x Oeste.**Figura 03 – Curvas de potência.**

A depender das condições climáticas locais, pode haver uma ligeira variação na orientação mais favorável à maximização da geração fotovoltaica. Em Curitiba (PR), por exemplo, observou-se um desempenho levemente superior em sistemas voltados para o oeste, possivelmente em função da ocorrência frequente de neblinas nas primeiras horas do dia, que reduzem a irradiação solar nas orientações a leste (GASPARIN, 2016). Em contrapartida, nas cidades de Brasília (DF) e Bom Jesus da Lapa (BA), registrou-se uma vantagem modesta para sistemas orientados a leste.

Em regiões de baixa latitude, próximas ao equador, a orientação ideal torna-se menos significativa. Nessas localidades, o Sol se posiciona ao sul do zênite local durante aproximadamente metade do ano, o que faz com que diferentes orientações azimutais apresentem desempenhos muito próximos (BURGER e RUTHER, 2006).

A diferença no desempenho de produção de energia elétrica entre sistemas fotovoltaicos orientados para Leste e para Oeste resulta da combinação de fatores climáticos locais e efeitos secundários que afetam o desempenho operacional dos módulos e do inversor ao longo do dia. O melhor rendimento observado em orientações a Leste em certas localidades pode ser atribuído aos efeitos de temperatura. As temperaturas de operação dos módulos de silício cristalino tendem a ser mais elevadas no período da tarde (quando o Sol incide em orientações Oeste) do que pela manhã (orientação Leste). Essa diferença da incidência solar pode ser vista na Figura 3, que mostra a assimetria entre as curvas de potência dos inversores com orientação Leste e Oeste em um dia típico ensolarado. Temperaturas de operação mais altas à tarde podem ocasionar redução na eficiência do módulo, levando a um desempenho mais baixo para sistemas orientados a Oeste.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo evidenciou que a orientação dos módulos influencia diretamente o desempenho do sistema fotovoltaico. Em Jacinto Machado (SC), a orientação Leste

apresentou maior produtividade anual, sobretudo nos meses de maior irradiação. Dessa forma, não existe uma orientação universalmente superior entre leste e oeste, a escolha ideal depende das condições locais. Por isso as simulações computacionais são tão importantes, pois permitem estimar previamente o desempenho energético em diferentes cenários de instalação. Neste trabalho, a diferença média observada entre a geração real e a simulada foi de 5,92%.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo apoio financeiro. Ao Núcleo de Tecnologia em Energia Elétrica (NTEEL) da UFSC e ao Centro de Pesquisa em Energia e Sustentabilidade (CPEES) também são reconhecidos.

REFERÊNCIAS

- BURGER, Bruno e RUTHER, Ricardo. Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. *Solar Energy*, v. 80, n. 1, p. 32–45, 2006.
- DAVI, Giovani Almeida e colab. Energy performance evaluation of a net plus-energy residential building with grid-connected photovoltaic system in Brazil. *Energy and Buildings*, v. 120, p. 19–29, 15 Maio 2016.
- GASPARIN, Fabiano Perin e KRENZINGER, Arno. Desempenho de um Sistema Fotovoltaico em Dez Cidades Brasileiras com Diferentes Orientações do Pannel. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 8, n. 1, p. 10–17, 2017.
- PINHO, João Tavares e GALDINO, Marco Antonio. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.
- RAMPINELLI, Giuliano Arns e MACHADO, Solange. *Manual de Sistemas Fotovoltaicos de Geração Distribuída - Teoria e Prática*. 1. ed. Curitiba: Brazil Publishing, 2021.
- ZOMER, Clarissa e colab. The balance between aesthetics and performance in building-integrated photovoltaics in the tropics. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 22, n. 7, p. 744–756, 1 Jul 2014.

ECONOMIA CIRCULAR EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: DESAFIOS E PERSPECTIVAS

Kamylle Gasperin¹, Jonathan Tonello², Leticia Toreti. Scarabelot³, Leonardo Elizeire. Bremermann⁴

¹ Universidade Federal de Santa Catarina / kamylle.gasperin@grad.com.br

² Universidade Federal de Santa Catarina / jonathantonello@hotmail.com

³ Centro de Pesquisa em Energia e Sustentabilidade / leticiascarabelot@yahoo.com.br

⁴ Universidade Federal de Santa Catarina / leonardo.bremermann@ufsc.br

Resumo: O crescimento acelerado da geração fotovoltaica tem impulsionado a discussão sobre o destino dos módulos em fim de vida, considerando o impacto ambiental e o desperdício de materiais críticos. Este trabalho tem como objetivo analisar a aplicação dos princípios da economia circular na gestão de resíduos fotovoltaicos, destacando estratégias de reutilização, reciclagem e recuperação de componentes, bem como os desafios regulatórios e tecnológicos associados. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica exploratória baseada em artigos científicos, dissertações, relatórios técnicos e documentos institucionais nacionais e internacionais, com ênfase em experiências e avanços recentes no setor. Os resultados evidenciam que a economia circular aplicada aos módulos fotovoltaicos oferece alternativas viáveis para prolongar sua vida útil e reinserir materiais valiosos em novas cadeias produtivas. Estudos realizados no Brasil mostraram que até 68% de módulos com mais de duas décadas de operação ainda apresentam condições de reaproveitamento, enquanto processos de reciclagem já permitem recuperar em média 90% dos materiais, e inserir e aproveitar em outros módulos. Contudo, persistem obstáculos como os elevados custos de reciclagem frente ao aterro, a dificuldade técnica da delaminação e a ausência de políticas públicas específicas no Brasil, ao contrário da União Europeia, que adota a responsabilidade estendida do produtor. As projeções econômicas, entretanto, demonstram grande potencial de valorização, estimando que o mercado de materiais reciclados alcance 450 milhões de dólares até 2030. Conclui-se que a integração entre regulamentação, logística reversa e investimento em pesquisa e desenvolvimento é essencial para consolidar um modelo circular no setor fotovoltaico, capaz de reduzir impactos ambientais, estimular a inovação e gerar benefícios econômicos e sociais alinhados à transição energética sustentável.

Palavras-chave: Economia circular; Módulos fotovoltaicos; Reciclagem; Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial da geração de energia solar fotovoltaica (FV) no mundo, impulsionado pela busca por uma matriz energética de baixo carbono, traz consigo um desafio emergente: a gestão dos resíduos de módulos em fim de vida. Projeções indicam que, até 2050, o volume acumulado de resíduos de módulos FV poderá ultrapassar 78 milhões de toneladas globalmente (Pivatto *et al.*, 2025; SunR, 2024). O modelo linear de produção, baseado em extrair, produzir, utilizar e descartar, mostra-se limitado diante desse cenário, especialmente pela perda de materiais críticos e pelo impacto ambiental associado ao descarte inadequado.

Nesse contexto, a Economia Circular (EC) surge como alternativa estratégica. Fundamentada nos princípios de reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar, a EC busca regenerar recursos e eliminar o conceito de fim de vida útil (Pivatto *et al.*, 2025). No setor fotovoltaico, essa abordagem pode viabilizar tanto a extensão da vida útil de módulos por meio de reutilização, reparo e remanufatura, quanto a recuperação de materiais valiosos como vidro, alumínio, prata e silício (Rosa, 2023; Heath *et al.* 2022). Assim, a incorporação de estratégias circulares é fundamental para garantir a sustentabilidade da transição energética.

O objetivo deste trabalho é analisar a aplicação da economia circular na gestão de módulos fotovoltaicos em fim de vida, destacando as estratégias existentes, seus desafios tecnológicos e regulatórios, bem como as perspectivas de valorização econômica e ambiental.

2 METODOLOGIA

O presente estudo é caracterizado como uma revisão bibliográfica de natureza exploratória conforme definido por Gil (2009). O levantamento do referencial teórico foi realizado na base de dados Google Acadêmico, que é uma ferramenta de busca gratuita, que indexa conteúdo acadêmico como artigos científicos, teses, livros, dissertações e resumos de diversas áreas. Ele é voltado para estudantes, pesquisadores e cientistas, oferecendo uma vasta quantidade de publicações científicas em diversas bases de dados. A pesquisa bibliográfica evidenciou a relevância do tema ao apresentar um volume expressivo de publicações associadas às palavras-chave investigadas. O termo “reciclagem de painéis solares” resultou em aproximadamente 15.300 registros, enquanto “economia circular fotovoltaica” retornou cerca de 5.880 documentos, e “logística reversa de módulos fotovoltaicos” apresentou aproximadamente 575 ocorrências.

A partir disso, foram selecionadas para análise aprofundada as publicações técnico-científicas mais aderentes ao escopo da pesquisa, com base na leitura de seus títulos e resumos. A análise dos dados foi conduzida de forma qualitativa e interpretativa, seguindo a abordagem proposta por Minayo (2014), permitindo identificar os desafios tecnológicos, as barreiras regulatórias e as oportunidades econômicas da transição para um modelo circular no setor fotovoltaico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da economia circular no setor fotovoltaico revela um conjunto de estratégias que podem transformar significativamente a gestão de módulos em fim de vida. Um dos aspectos mais relevantes é a possibilidade de extensão da vida útil dos equipamentos, seja pela reutilização em sistemas de menor demanda energética, como iluminação pública e projetos sociais, seja pela remanufatura e reparo de componentes defeituosos. Estudos realizados no Brasil demonstraram que aproximadamente 68% de módulos avaliados após 22 anos de operação ainda apresentavam condições adequadas para reaproveitamento, o que evidencia o potencial de segunda vida desses dispositivos e a importância da padronização

de protocolos de testes que assegurem qualidade e segurança em sua reinserção (Pivatto *et al.*, 2025).

A reciclagem de módulos fotovoltaicos também se mostra viável e já alcança entre 80% e 95% de recuperação em massa de materiais, incluindo vidro, alumínio, silício e metais nobres como prata e índio em instalações de reciclagem existentes (Heath *et al.*, 2022). Essa prática, além de reduzir o volume de resíduos, garante a reinserção de matérias-primas críticas em cadeias produtivas estratégicas, contribuindo tanto para a diminuição da pressão sobre recursos naturais quanto para a criação de novas oportunidades econômicas como demonstrado na Tabela 1 (Heath *et al.* 2022).

Tabela 1 - Possibilidades do reaproveitamento dos componentes do módulo FV

Componente	Possibilidades da reinserção
Vidro	Aplicação nas indústrias de vidro, lâ de vidro, construções e em novos módulos fotovoltaicos,
EVA	Aplicação na indústria química e na recuperação de energia de incineração.
Semicondutor da primeira geração	Aplicação em novos <i>wafers</i> e na indústria fotovoltaica como semicondutor e como agregados para forno de fundição metalúrgica.
Semicondutor da segunda geração	Aplicados a novas células ou sua reutilização.
Metais com alto valor e alumínio	Reutilização com seu nível de pureza original.

Fonte: Adaptado de Silveira e Junior (2022).

Entretanto, os resultados obtidos por diferentes tecnologias de reciclagem evidenciam desafios técnicos e econômicos que precisam ser superados. A etapa de delaminação dos módulos fotovoltaicos apresenta elevada complexidade, uma vez que esses equipamentos são projetados para resistir por aproximadamente 25 a 30 anos às intempéries ambientais, como chuva, neve e granizo, o que dificulta a separação das camadas constituintes e eleva os custos do processo de reciclagem (Prado, 2018).

Outro desafio recorrente é o elevado custo do processo de reciclagem quando comparado ao descarte em aterros. Essa realidade se agrava em países que ainda não possuem regulamentações específicas para resíduos fotovoltaicos, como é o caso do Brasil. Diferentemente da União Europeia, onde vigora a responsabilidade estendida do produtor sob a Diretiva WEEE (2012/19/EU), o cenário brasileiro ainda carece de políticas públicas direcionadas à reciclagem de módulos FV, o que limita a consolidação de uma cadeia estruturada e economicamente viável (Silveira; Junior, 2022). Além disso, a ausência de

infraestrutura industrial especializada restringe a escala das operações e impede que o país explore todo o potencial econômico associado à recuperação de materiais.

Apesar dessas limitações, as perspectivas para o setor são promissoras. Estimativas indicam que os materiais recuperados de módulos em fim de vida podem gerar um valor agregado de até 450 milhões de dólares até 2030, tornando a reciclagem uma atividade estratégica não apenas do ponto de vista ambiental, mas também econômico (Silveira; Junior, 2022). Processos inovadores, como a delaminação por solventes e a aplicação de rotas hidrometalúrgicas, como a lixiviação seletiva da prata e do índio onde vêm demonstrando resultados relevantes em pesquisas recentes, contribuindo para aumentar as taxas de recuperação de materiais e reduzir impactos ambientais associados à reciclagem de módulos fotovoltaicos além de reforçar seu papel estratégico na transição energética global, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, em especial ao ODS 12, que trata de produção e consumo responsáveis (Prado, 2018).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A economia circular aplicada aos módulos fotovoltaicos representa uma oportunidade estratégica para enfrentar os desafios ambientais e de suprimento de recursos críticos na transição energética. Embora existam barreiras técnicas, econômicas e regulatórias, as perspectivas apontam para um mercado em expansão, capaz de recuperar grande parte dos materiais e prolongar a vida útil dos equipamentos.

Para o Brasil, torna-se urgente a criação de políticas públicas específicas, baseadas em exemplos internacionais, que estabeleçam a responsabilidade estendida do produtor e incentivem a instalação de plantas de reciclagem dedicadas. A integração entre governo, setor privado e centros de pesquisa é essencial para viabilizar soluções sustentáveis e competitivas. Assim, os princípios da economia circular não apenas reduzem impactos ambientais, mas também oferecem oportunidades econômicas e sociais, fortalecendo a resiliência da cadeia fotovoltaica e garantindo um futuro energético mais sustentável. Por se tratar de uma pesquisa exploratória baseada em revisão bibliográfica, os resultados aqui apresentados fornecem uma visão abrangente sobre os desafios e perspectivas da economia circular em módulos fotovoltaicos, mas reforçam a necessidade de estudos empíricos que aprofundem as soluções tecnológicas e regulatórias.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – Campus Araranguá, ao Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica (NTEEL Solar) e ao Centro de Pesquisa em Energia e Sustentabilidade (CPEES), pelo suporte e incentivo à realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2009.
- HEATH, G. *et al.* *A critical review of the circular economy for lithium-ion batteries and photovoltaic modules – status, challenges, and opportunities*. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 72, n. 6, jun. 2022.
- MINAYO, M. C. de S. **O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde**. 14. ed. São Paulo: Editora Hucitec, 2014.
- PIVATTO, M. *et al.* *Circular solar economy: PV modules decision-making framework for reuse*. **Journal of Cleaner Production**, v. 493, p. 144941, 2025.
- PRADO, P. F. A. **Reciclagem de painéis fotovoltaicos e recuperação de metais**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-30012019-141410/pt-br.php>. Acesso em: 13 set. 2025.
- ROSA, G. **Logística reversa de módulos fotovoltaicos: principais rotas tecnológicas de reciclagem**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2023. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/85931>. Acesso em: 13 set. 2025.
- SILVEIRA, N. S.; JUNIOR, J. U. Cadeia de valor na reciclagem de módulos fotovoltaicos. **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS**, [S. l.], p. 1–10, 2022. DOI: 10.59627/cbens.2022.1058. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1058>. Acesso em: 4 out. 2025.
- SUNR. **Tecnologia pioneira na reciclagem de módulos fotovoltaicos: conheça a solução da SunR**. 2024. Disponível em: <https://sunr.com.br/2024/12/12/tecnologia-de-reciclagem-fotovoltaica-sunr/>. Acesso em: 13 set. 2025.

HIDROGÊNIO VERDE VIA ELETRÓLISE DA ÁGUA: ANÁLISE COMPARATIVA DE TECNOLOGIAS

SCANDOLARA, L. C. W.¹, RANDO, J. V.¹, SOUZA, R. R. M.¹, DA SILVA JÚNIOR, A. H.²,
BELCHIOR, L. F.²

¹ UFSC/ENE/Araranguá/luiz.scandolara@grad.ufsc.com

² UFSC/PPGES/Araranguá

Resumo: A crescente poluição e o aquecimento global têm impulsionado a busca por soluções sustentáveis na produção de energia renovável e limpa. Entre elas, destaca-se o hidrogênio verde através de eletrólise, que além de gerar energia, atua como forma estratégica de armazenamento energético. Pesquisas e investimentos globais reforçam seu potencial no combate às emissões de carbono. No entanto, a escolha da tecnologia adequada dependerá de fatores como custo, escala e recursos disponíveis. Neste contexto, este trabalho busca realizar uma revisão de escopo sobre tecnologias de eletrólise, destacando as vantagens e desvantagens de cada processo com enfoque nos materiais estratégicos empregados em cada tecnologia.

Palavras-chave: Eletrólise, hidrogênio verde, energia, armazenamento energético.

1 INTRODUÇÃO

A partir da crescente margem de poluição vista no planeta, a sociedade busca, cada vez mais, maneiras sustentáveis de produção de energia renovável e limpa, como medida para combater a descarbonização. O aumento da temperatura global preocupa pesquisadores e nações que trabalham em prol da neutralização do carbono, desenvolvendo projetos que buscam uma limpa prosperidade energética (DASH, S. et al., 2024).

Análogo a isso, pesquisas fomentadas por instituições descobriram inúmeras formas sustentáveis de geração de energia, entre essas, destacando-se a produção de Hidrogênio Verde (H2V), que além do grande potencial para geração de energia, também apresenta características de armazenamento energético, fator indispensável para o setor atualmente (DASH, S. et al., 2024).

O compromisso global com o H2V, evidenciado pelo aumento exponencial de publicações e pelo compromisso da Europa e de outros países em investir em capacidade de eletrólise, sugere um futuro promissor para um portfólio diversificado de tecnologias. A escolha da tecnologia ideal dependerá, em última análise, da aplicação específica, do custo, da escala e da disponibilidade de recursos energéticos (FERNÁNDEZ-ARIAS, P. et al., 2024).

A eletrólise da água é o processo fundamental da produção de hidrogênio verde. Este processo utiliza eletricidade para decompor a água (H₂O) nos seus componentes básicos: hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂), onde a reação global é expressa por $H_2O \rightarrow H_2 + 1/2O_2$. Assim, a denominação de H2V se refere a utilização de eletricidade oriunda de matrizes renováveis, como eólicas, solares, entre outras. Atualmente, existem três principais vertentes de eletrólise da água: Eletrólise por Membrana de Troca de Prótons (PEM), Eletrólise de Água Alcalina (AWE) e Eletrólise de Óxidos Sólidos (SOEC) (HAMICHE, A. M. et al., 2025).

Neste trabalho é apresentada uma revisão de escopo utilizando a base de dados Scopus. As principais tecnologias são discutidas em relação aos princípios de funcionamento e matérias empregados para cada tecnologia.

2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.1 AWE

A AWE (*Alkaline water electrolysis*) utiliza uma solução aquosa alcalina, tipicamente hidróxido de potássio (KOH), como eletrólito. A água é dividida no cátodo para produzir hidrogênio gasoso (H_2) e íons de hidróxido (OH^-). Estes íons migram através de um diafragma permeável para o ânodo, onde reagem para formar oxigênio gasoso (O_2) e água. O diafragma ou separador é crucial para separar o hidrogênio e o oxigênio produzidos e para evitar que se misturem. A principal vantagem da AWE em relação a outras tecnologias é a utilização de materiais de baixo custo para os seus componentes principais, o que contribui para a sua viabilidade econômica (FERNÁNDEZ-ARIAS, P. et al., 2024).

O processo eletroquímico pode ser descrito pelas seguintes duas semi-reações. No cátodo, a reação de evolução de hidrogênio (HER), a equação é expressa por $2H_2O(l) + 2e^- \rightarrow H_2(g) + 2OH^-(aq)$. No ânodo, a reação de evolução de (OER), a equação é expressa por $2OH^-(aq) \rightarrow 1/2O_2(g) + H_2O(l) + 2e^-$. Dessa forma, a reação global é expressa por $H_2O(l) \rightarrow H_2(g) + 1/2O_2(g)$ (HAMICHE, A. M. et al., 2025).

No ânodo, utiliza-se predominantemente óxidos/hidróxidos de níquel e ferro, sendo o sistema o mais eficiente. Dessa forma, a incorporação sinérgica de $FeOOH$ é crucial para a ativação. A composição do cátodo inclui geralmente óxidos e, de forma crescente, materiais de metal de transição não-óxidos, como Fosfetos de Níquel e Sulfetos de Níquel, essenciais para a compatibilidade no meio alcalino, por serem materiais eficientes, duráveis e resistentes à corrosão no ambiente. Pesquisas recentes focam na melhoria da eficiência catalítica através da nanotecnologia e da otimização da composição do eletrólito, como a integração de ligas amorfas de $NiFeOOH$ e o uso de ligas de alta entropia (DASH, S. et al., 2024).

Com relação aos diafragmas, tradicionalmente era utilizado de amianto, mas foram substituídos por materiais mais seguros e eficientes, como óxidos de zircônio ou polímeros como a polissulfona e o polifenileno sulfeto (DASH, S. et al., 2024).

2.2 PEM

A eletrólise por membrana de troca protônica (PEM) produz hidrogênio de alta pureza a partir da separação da água, utilizando uma membrana polimérica condutora que

permite o transporte de prótons do ânodo ao cátodo sob aplicação de corrente elétrica. Trata-se de uma tecnologia eficiente, compacta e responsiva, adequada para integração com fontes renováveis e capaz de gerar hidrogênio pressurizado de forma direta (AMORIM, I. et al., 2024).

Nos eletrodos, catalisadores à base de metais nobres, como platina e irídio, são empregados para acelerar as reações de oxidação e redução. No ânodo, a água é oxidada, liberando oxigênio, prótons e elétrons; os prótons atravessam a membrana e, no cátodo, reagem com os elétrons para formar hidrogênio de alta pureza. Essa configuração permite não apenas uma operação eficiente e compacta, mas também a produção direta de hidrogênio pressurizado, facilitando o armazenamento e o transporte (CARMO et al., 2013).

A escolha dos materiais é fundamental para o desempenho da célula. Membranas de polímeros perfluorados com grupos ácido sulfônico, como Nafion®, são amplamente utilizadas devido à sua elevada condutividade e estabilidade química. Pesquisas recentes exploram alternativas como polietersulfona (PES), poli(éter-éter-cetona) sulfonado (SPEEK) e adição de nanopartículas para melhorar a condutividade e a durabilidade (AMORIM, I. et al., 2024).

2.3 SOEC

A eletrólise de óxidos sólidos (SOEC) é uma tecnologia que opera em altas temperaturas (entre 600°C e 900°C), sendo considerada a mais eficiente para a produção de hidrogênio, atingindo níveis de até 90% de eficiência de conversão de eletricidade para hidrogênio. Sua principal vantagem é a capacidade de usar calor de alta temperatura de fontes como reatores nucleares e calor residual industrial, o que reduz a demanda por eletricidade, que é tipicamente a parte mais cara do processo (FALLAH VOSTAKOLA, M. et al., 2023).

O funcionamento da SOEC é baseado em uma estrutura tipo sanduíche: um eletrodo de hidrogênio (cátodo), um eletrólito e um eletrodo de oxigênio (ânodo). A SOEC é dividida em dois tipos com base no íon transportado pelo eletrólito. (FALLAH VOSTAKOLA, M. et al., 2023).

No processo da O-SOEC (Células com Condutor de Íons de Oxigênio), o vapor d'água (H₂O) é alimentado no eletrodo de hidrogênio e é dividido em hidrogênio gasoso (H₂) e íons de oxigênio (O²⁻). Os íons de oxigênio migram através do eletrólito denso para o eletrodo de oxigênio, onde liberam elétrons e se recombina para formar gás oxigênio (O₂). O hidrogênio é produzido no lado do vapor, exigindo uma etapa de purificação ou secagem posterior. A reação do cátodo é expressa por $\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$, enquanto a do ânodo é expressa por $\text{O}_2^- \rightarrow 1/2 \text{O}_2 + 2\text{e}^-$ (HAMICHE, A. M. et al., 2025).

Em contraste, na H-SOEC, o vapor d'água (H_2O) é alimentado no eletrodo de oxigênio (ânodo), onde é dividido em oxigênio gasoso (O_2) e prótons (H^+). Os prótons migram através do eletrólito condutor de prótons para o eletrodo de hidrogênio (cátodo), onde se recombina com elétrons para formar gás hidrogênio (H_2) puro e seco. A reação do cátodo é expressa por $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$, enquanto a do ânodo é expressa por $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + 1/2 \text{O}_2 + 2\text{e}^-$ (HAMICHE, A. M. et al., 2025).

Na aplicação do eletrólito no O-HOEC, a zircônia estabilizada com ítria (YSZ) é o material mais comum. Analisando os eletrodos, o cátodo é composto por um compósito de partículas cerâmicas dispersas em uma matriz cerâmica (cermet), usualmente de níquel-YSZ (Ni-YSZ). O níquel atua como catalisador e condutor eletrônico, enquanto o YSZ conduz os íons de oxigênio. Já o ânodo é composto por materiais de perovskita, como manganito de lantânio e estrôncio (LSM) e cobalto-ferrito de lantânio e estrôncio (LSCF). O LSCF é preferido por sua alta condutividade, mas apresenta problemas de incompatibilidade térmica com o eletrólito de YSZ (LIU, H. et al., 2024).

Os eletrólitos do H-SOEC apresentam condutores de prótons, como perovskitas à base de bário (BZY e BZCY), que operam em temperaturas mais baixas (400-700°C). Os cátodos são compostos por Cermets de níquel com condutores de prótons (Ni-BZY, Ni-BZCY), já os ânodos são compostos de materiais triplamente condutores (TCOs) que conduzem íons de oxigênio, prótons e elétrons simultaneamente, maximizando os sítios de reação (NORMAN, E. A. et al., 2024).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na análise realizada, evidencia-se diferentes rotas de eletrólise da água, — AWE, PEM e SOEC — com potencial significativo para impulsionar a produção de hidrogênio verde, apresentando vantagens e limitações próprias. Diante disso, a AWE se destaca por viabilidade econômica e materiais de baixo custo, sendo essa a mais estabelecida no mercado atualmente, a PEM se consolida com maior pureza e flexibilidade operacional, e a SOEC apresenta eficiência superior ao integrar calor no processo. Essas características reforçam a necessidade de avanços contínuos em materiais, a fim de superar desafios nos processos. Assim, a consolidação do hidrogênio verde como vetor energético dependerá não apenas do desenvolvimento tecnológico dessas rotas, mas também da integração de infraestrutura adequada e investimentos estratégicos.

REFERÊNCIAS

- DASH, S. et al. **Advances in green hydrogen production through alkaline water electrolysis: A comprehensive review.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 83, p. 614-629, 2024.
- FALLAH VOSTAKOLA, M. et al. **Recent Advances in High-Temperature Steam Electrolysis with Solid Oxide Electrolysers for Green Hydrogen Production.** Energies, v. 16, p. 3327, 2023.
- FERNÁNDEZ-ARIAS, P. et al. **On Green Hydrogen Generation Technologies: A Bibliometric Review.** Applied Sciences, v. 14, p. 2524, 2024.
- CARMO, M. et al. **A comprehensive review on PEM water electrolysis.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 38, p. 4901-4934, 2013.
- HAMICHE, A. M. et al. **Advances in steam electrolysis for green hydrogen production: Current status and future outlook.** Fuel, v. 395, p. 135165, 2025.
- NORMAN, E. A. et al. **Steam electrolysis for green hydrogen generation. State of the art and research perspective.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 202, p. 114725, 2024.
- LIU, H. et al. **High Temperature Solid Oxide Electrolysis for Green Hydrogen Production.** Chemical Reviews, v. 124, p. 10509-10576, 2024.
- AMORIM, I. et al. **Overall alkaline water electrolysis over active, stable, low loading iridium catalysts sputtered on nickel foam.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 92, p. 852-864, 2024.

ENERGIA E MEIO AMBIENTE COM REALIDADE AUMENTADA: OFICINAS DE EXTENSÃO NAS ESCOLAS PÚBLICAS DE SANTA CATARINA

Davi Pereira Sampaio¹, Ana Paula Cervinski², Lucas Batista Crepaldi², Vinícius Antônio Oliveira Cosmam¹, Jéssika Sumariva Saturno², Ananda Shanti Saad Cipolat¹, Elise Sommer Watzko³, Eliane Pozzebon⁴, Elaine Virmond³

¹ Universidade Federal de Santa Catarina /davipereirasampaio1@gmail.com, vinicosmam@gmail.com, anandashantibr@gmail.com

² Universidade Federal de Santa Catarina/Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade/cervinskiap@gmail.com, crepaldimt@gmail.com, jessikasumarivasaturno@gmail.com

³ Universidade Federal de Santa Catarina/Departamento de Energia e Sustentabilidade/elise.sommer@ufsc.br, elaine.virmond@ufsc.br

⁴ Universidade Federal de Santa Catarina/Departamento de Computação/eliane.pozzebon@ufsc.br

Resumo: A Realidade Aumentada (RA) é uma tecnologia interativa que integra objetos virtuais a ambientes reais por meio de dispositivos móveis, favorecendo a aprendizagem ativa. Este trabalho, de caráter descritivo e qualitativo em formato de relato de experiência, buscou compreender o impacto da RA no ensino de jovens do ensino fundamental II e do ensino médio em oficinas escolares. As atividades, com duração de 50 minutos, foram organizadas em três etapas: (i) apresentação dos conteúdos; (ii) interação com tablets e cards dos kits Energia e Meio Ambiente do Programa RA nas Escolas (LabTeC/UFSC Araranguá); e (iii) aplicação de questionário para avaliar a experiência dos estudantes. No total, foram realizadas 25 oficinas em escolas públicas de duas cidades de Santa Catarina, envolvendo 636 alunos. Apenas 20,75% dos participantes já conheciam previamente os kits de RA. A duração das oficinas foi considerada suficiente por 85,69% dos alunos, enquanto a maioria classificou os temas e os recursos como “ótimos”. Os resultados evidenciam ampla aceitação da tecnologia e apontam o potencial da RA para enriquecer o ensino de Energia e Meio Ambiente na educação básica, além de abrir espaço para novas oficinas com esta tecnologia, contemplando diferentes conteúdos e faixas etárias, bem como fomentando pesquisas futuras sobre sua eficácia em distintos contextos educacionais.

Palavras-chave: Realidade Aumentada, Extensão universitária, Meio Ambiente, Energia.

1 INTRODUÇÃO

A Realidade Aumentada (RA) é uma tecnologia interativa que permite a integração de objetos virtuais em ambientes reais através de dispositivos móveis (Zuo, Wenling e Xuemei, 2025). Assim, é possível criar ambientes de aprendizagem experiencial facilitando o entendimento de conceitos e promovendo abordagens pedagógicas diferenciadas que possam aprimorar o processo de ensino-aprendizagem (Lopes, et al. 2019). No entanto, por ser uma ferramenta relativamente nova, é necessário realizar ações de difusão nas escolas demonstrando a sua utilidade e proporcionando inovação e tecnologia para a sala de aula. Devido a isto, ações de extensão universitária são essenciais para promover diversas oportunidades de desenvolvimento e aproximação da Universidade com a comunidade externa, articulando a indissociabilidade entre ensino, pesquisa e extensão (Costa, 2018).

Dessa maneira, o objetivo deste trabalho foi fazer um relato de experiência referente às atividades de extensão desenvolvidas de março a setembro de 2025 abordando temas relacionados à energia e meio ambiente utilizando artefatos de RA, especificamente o Kit Meio Ambiente e o Kit Energia do Programa RA nas Escolas (<https://raescolas.ufsc.br/>). Esses kits foram elaborados anteriormente, sob coordenação do LabTeC - Laboratório de Tecnologias Computacionais em parceria com o NUDAPE - Núcleo de Desenvolvimento de

Processos de Produção de Energia, ambos da UFSC - Campus Araranguá, sendo parte de outro projeto de extensão “Desenvolvimento de artefatos com Realidade Aumentada (RA) para o ensino de ciências da natureza” (SIGPEX nº202202976), financiado pelo MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação e executado no período de 01/04/2022 a 18/04/2024.

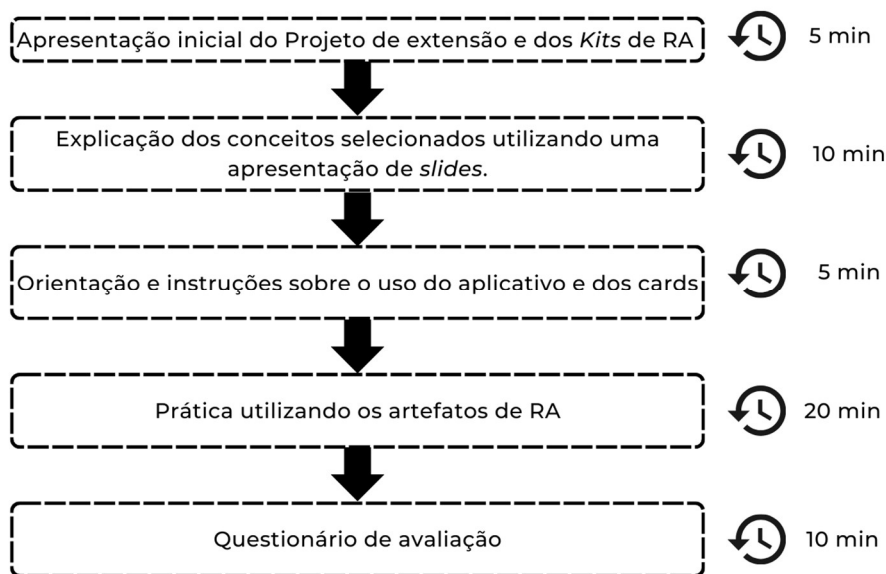
2 METODOLOGIA

Este trabalho é caracterizado como um estudo descritivo de natureza qualitativa em formato de relato de experiência, a partir do desenvolvimento de atividades no âmbito de um projeto de extensão universitária intitulado: “Aprendendo sobre energia e meio ambiente utilizando artefatos com realidade aumentada – fase 2 (SIGPEX nº 202416276)”, desenvolvido na UFSC - *Campus Araranguá* durante o período de março a setembro de 2025.

Foram atendidas, no período correspondente a este relato, alunos do ensino básico de duas escolas públicas localizadas nos municípios de Araranguá - SC e Arroio do Silva - SC, nas quais se realizaram oficinas para difusão dos kits Meio Ambiente e Energia do Programa RA nas Escolas.

Todas as oficinas tiveram duração de 50 minutos e devido ao tempo restritivo, os professores foram orientados a selecionar até 7 assuntos abordados nos kits para serem trabalhados em cada atividade, divididos conforme o fluxograma da Figura 01. Inicialmente, o projeto e os materiais impressos e digitais eram apresentados aos alunos, seguido de uma breve explanação dos tópicos de cada tema selecionado utilizando uma apresentação em formato de slides para ilustrar os conceitos e guiar a explicação. Após, eram distribuídos os *cards* selecionados juntamente com um *tablet* para grupos de até 3 estudantes. Eles foram orientados e auxiliados para acessar o aplicativo Zappar, disponível gratuitamente para os sistemas Android® e iOS®, para interagir com o objeto de cada *card* através de aproximações, movimentações e animações. Além disso, cada *card* possui informações complementares e um *quiz* para fixação do conteúdo. E, para encerramento, todos eram convidados a responder um questionário de avaliação final.

Figura 01: Fluxograma metodológico de aplicação das oficinas



Fonte: os autores (2025)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas 25 oficinas, totalizando 636 alunos, no período de março a setembro de 2025, atendendo turmas do ensino fundamental ao ensino médio de duas escolas públicas dos municípios de Araranguá - SC e Arroio do Silva - SC.

Devido à restrição de tempo de cada oficina (50 minutos), foram selecionados até sete *cards* de cada kit para serem trabalhados em cada atividade, assim cada oficina foi voltada para o tema que o professor já havia trabalhado com cada turma. Ou seja, as oficinas foram distintas entre si. No geral, dentre todas, foram abordados do Kit Energia os seguintes: Energia Maremotriz, Energia Eólica, Energia Ondomotriz, Energia Hidrelétrica, Energia Solar Fotovoltaica. E, do Kit Meio ambiente: Chuva ácida, Efeito Estufa, Casa Sustentável, Reciclagem de Papel, Reciclagem de Metal, Reciclagem de Plástico, Reciclagem de Vidro, Aterro Sanitário, Compostagem, Processo de Extração do Petróleo e Gás Natural, Efeito Estufa, Processo de formação do Petróleo e Gás natural, Ciclo do Carbono e Carbonificação.

A Figura 02 ilustra alguns momentos de interação durante as atividades. Ao final de cada atividade, conforme descrito na metodologia, foi aplicado um questionário de avaliação final da atividade, contendo algumas questões gerais acerca da oficina. A primeira questão foi para verificar se os alunos conheciam ou já tinham tido contato com os kits de RA utilizados e somente 20,75% deles já tinham tido algum contato com o material utilizado, enfatizando a importância da realização destas atividades de extensão visando a divulgação desse material.

Figura 02: Interação com os kits durante as oficinas



Fonte: os autores (2025)

Quanto à duração da atividade, 85,69% afirmaram ter sido suficiente, a maioria também classificou os temas abordados (78,46%) e os recursos utilizados (81,45%) como ótimos. As turmas que tiveram uma maior quantidade de *cards* selecionados, também foram as que mais consideraram o tempo insuficiente, por não conseguirem interagir com todos os materiais ou por consideraram pouco tempo para utilizar todos os recursos. Assim, verifica-se que para este tempo, é melhor limitar a quantidade de *cards* visando um maior aproveitamento de cada um deles.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho faz parte de um projeto de extensão em andamento. Conclui-se que os resultados já alcançados na divulgação e utilização dos kits Meio Ambiente e Energia evidenciam que os objetivos propostos vêm sendo cumpridos, visto que, até o momento, 636 estudantes da comunidade externa à universidade participaram das oficinas apenas neste ano. Além disso, ainda que não contabilizado de forma sistemática, diversos professores também tiveram contato com a ferramenta inovadora durante as atividades, o que pode favorecer sua incorporação em práticas docentes futuras. Do ponto de vista científico, o estudo contribui ao apresentar dados quantitativos de aceitação da tecnologia em larga escala, relatando uma experiência inédita de extensão com Realidade Aumentada aplicada ao ensino de Energia e Meio Ambiente, em consonância com pesquisas recentes que comprovam o

impacto positivo da RA na aprendizagem e no engajamento dos estudantes (SAFITRI et al., 2025). Como trabalhos futuros, propõe-se ampliar a investigação para diferentes contextos escolares, desenvolver avaliações de impacto com medidas de aprendizagem pré e pós-intervenção, estruturar formações continuadas para professores e analisar a sustentabilidade da adoção dos kits no longo prazo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Pró-Reitoria de Extensão (PROEX) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pela bolsa de extensão (Edital Nº 13/2024/PROEX - Programa de Bolsas de Extensão - PROBOLSAS 2025).

REFERÊNCIAS

LOPES, L. M. D.; VIDOTTO, K. N. S.; POZZEBON, E.; FERENHOF, H. A. Inovações Educacionais com o Uso da Realidade Aumentada: Uma Revisão Sistemática. **Educação em Revista**, v. 35, p. e197403, 2019.

ZUO, Ruijia; WENLING, Li; XUEMEI, Zhang. Augmented Reality and Student Motivation: a systematic review (2013-2024). **Journal Of Computers For Science And Mathematics Learning**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 38-52, 10 fev. 2025. PT Scientia Publica Media. <http://dx.doi.org/10.70232/jcsml.v2i1.23>.

COSTA, José Fernando Andrade. Articulação entre pesquisa, ensino e extensão: um desafio que permanece. **Revista Ciência em Extensão**, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 9-19, 30 jun. 2018. Revista Ciência em Extensão - RCE. <http://dx.doi.org/10.23901/1679-4605.2018v14n2p9-19>.

SAFITRI, D.; MARINI, A.; IRWANSYAH, P.; SUDRAJAT, A. Transforming environmental education with augmented reality: A model for learning outcome. **Social Sciences & Humanities Open**, v. 12, p. 101796, 2025. DOI: <https://dxdoi.org/10.1016/j.ssaho.2025.101796>.

EDUCAÇÃO AMBIENTAL PARA A GESTÃO E GOVERNANÇA DAS ÁGUAS: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO RIO ARARANGUÁ, SUL DE SANTA CATARINA, BRASIL

Simoni Daminelli Vieira¹, Carlyle T. B. de Menezes², Ana Paula de Matos³

¹ Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC/simoni.daminelli@gmail.com

² Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC/cbm@unesc.net

³ Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC/mattos@unesc.net

Resumo: A pesquisa analisou contribuições da Educação Ambiental Crítica (EAC) para a gestão e governança das águas na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá (BHRA), no sul de Santa Catarina. O estudo parte da constatação de que a água, recurso essencial à vida, tem sido severamente impactada por atividades humanas, como mineração de carvão, agricultura e expansão urbana, gerando escassez e estresse hídrico. O estudo destaca a importância de adotar abordagens críticas e democráticas no cuidado com a água e os territórios, atribuindo à Educação Ambiental (EA) um papel central na promoção de práticas sustentáveis e integradas. A investigação utilizou abordagem qualitativa, com estudo de caso em uma escola pública municipal de Criciúma (SC), articulada às ações do Projeto ProFor Águas UNESC. Foram acompanhadas oficinas de EA promovidas pelo Comitê da Bacia Hidrográfica, analisando seus efeitos por meio de entrevistas narrativas com professores e observação participante. O referencial teórico fundamentou-se na perspectiva da EAC, voltada à formação de sujeitos críticos e emancipados, capazes de intervir na realidade socioambiental. Os resultados indicaram que as oficinas ampliaram o conhecimento sobre problemas socioambientais locais, estimularam a participação cidadã e incentivaram práticas pedagógicas interdisciplinares e contextualizadas. Constatou-se que a inserção contínua da EAC na escola, articulada aos comitês de bacia e comunidades, fortalece a governança hídrica e contribui para uma gestão mais democrática, inclusiva e transformadora. Foram identificados desafios, como a fragilidade na formação continuada de educadores, a invisibilidade dos comitês perante a comunidade escolar e a ausência de políticas públicas integradas que consolidem a interface entre educação e governança das águas. O estudo recomenda aprimorar as ações formativas, engajar atores nos espaços colegiados de decisão da BHRA e ampliar iniciativas de mobilização e divulgação, como estratégias essenciais para a construção de uma sociedade mais consciente e comprometida com a conservação dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Consciência Ambiental; Educação Ambiental Crítica; Governança das águas; Políticas Públicas.

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso vital e um direito fundamental para a sobrevivência de todos os seres vivos, através do seu papel estratégico nos diferentes aspectos da vida cotidiana e dos ecossistemas.

Porém a qualidade, tem sido severamente impactada pela poluição e a degradação, afetando a segurança e sua adequação para usos diversos, como abastecimento doméstico, irrigação agrícola e processos industriais, entre outros. Nesse contexto, sua gestão sustentável configura-se como um desafio essencial para a manutenção da vida, exigindo a formulação e implementação de políticas públicas que integrem a gestão ambiental à participação social, de modo a fortalecer práticas coletivas e corresponsáveis na proteção dos recursos hídricos (Menezes; Waterkemper, 2009; Virtuoso; Menezes; Assunção, 2020).

A Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá (BHRA), área do estudo de caso, tem sua qualidade comprometida por impactos em seus cursos de água, resultando em sérios problemas de abastecimento para consumo humano. Esse processo de degradação ambiental está relacionado com a história econômica da região, especialmente com a expansão da

indústria carbonífera. Carola e Dassi (2014) descrevem que a degradação do rio Mãe Luzia, um dos principais afluentes do rio Araranguá, foi intensificada com a expansão da indústria carbonífera, especialmente após a instalação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) na década de 1940.

A falta de controle ambiental nas atividades de mineração de carvão, resultou em passivos ambientais que ainda afetam a BHRA. Além dos poluentes provenientes da mineração, o rio também recebe grande carga de contaminantes da indústria química e da agricultura, especialmente devido ao cultivo de arroz irrigado, prática comum na região sul.

O caminho de degradação e destruição na BHRA também pode ser identificado ao percorrer as ruas da cidade de Criciúma, já que é quase impossível perceber a presença do rio que leva o nome do município, uma vez que grande parte de seu curso está canalizada e oculta pelas inúmeras galerias e tubulações.

Há extensas porções do território da BHRA que, embora sofram pressões antrópicas, não estão diretamente ligadas à atividade carbonífera. É o caso de diversos afluentes do Rio Araranguá situados na região da Associação dos Municípios do Extremo Sul Catarinense (AMESC), como os rios Itoupava, Manuel Alves e Mãe Luzia. O rio Araranguá, é formado a partir da confluência dos rios Mãe Luzia e Itoupava, ambos severamente impactados por significativas cargas de poluentes, comprometendo a qualidade das águas utilizadas para atividades econômicas, dentre as quais, a agricultura, criação de gado e atividades pesqueiras.

Papel da Educação Ambiental e o Comitê de Bacia

Diante do cenário de degradação da bacia hidrográfica (BH), as Políticas Públicas (PP) devem ser compreendidas como prioridades constitucionais obrigatórias. Cabe destacar que tais políticas possuem repercussões amplas, alcançando indivíduos com diferentes níveis de escolaridade e condições socioeconômicas. Esse efeito torna-se especialmente evidente no campo das políticas ambientais, frente à persistente e crescente degradação observada na atualidade (Secco et al., 2022).

Apesar da existência de instrumentos como a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei 9.433/1997) e os Comitês de Bacias, persistem problemas como baixos investimentos em saneamento, descontinuidade das ações educativas, pouca mobilização social e escassa contribuição do setor privado para a preservação, enquanto este concentra a exploração dos recursos e gera impactos negativos. Nesse contexto, a pesquisa buscou compreender como processos educativos em uma escola pública do território da BH podem fortalecer a participação social e a governança integrada das águas, alinhados à EAC, que

segundo Loureiro (2015), deve superar abordagens técnicas, assumindo uma postura emancipadora e transformadora que promova mudanças das condições objetivas de existência e das formas de interação com a natureza.

2 METODOLOGIA

Esta pesquisa adotou uma abordagem qualitativa e exploratória, alinhada a temática da EAC, por entender que os desafios socioambientais exigem processos formativos que valorizem, a escuta, o diálogo e a construção coletiva do conhecimento (Freire, 1974; Loureiro, 2006). Utilizou-se como estratégia o estudo de caso sendo definida como unidade de estudo a escola municipal Judite Duarte de Oliveira, localizada no bairro Sangão, município de Criciúma.

A coleta dos dados foi orientada por dois procedimentos principais: Entrevistas narrativas com docentes da escola selecionada; Observação participante, realizada ao longo de atividades promovidas no âmbito do projeto ProFor Águas Unesc, do qual os autores fizeram parte da equipe técnica. O público-alvo da pesquisa foi composto por 05 professores, indicados pela direção da escola, oportunizando a participação de docentes de diferentes disciplinas, buscando formar uma amostra interdisciplinar. As entrevistas ocorreram durante o período de hora-atividade nas dependências da escola, entre os meses de outubro e dezembro de 2024, com duração média de 30 minutos, registradas em áudio, utilizando gravador. O roteiro de entrevistas foi elaborado com perguntas abertas possibilitando uma abordagem exploratória e reflexiva.

A observação participante foi realizada entre março de 2023 e abril de 2025, englobando o acompanhamento sistemático de oficinas de EA, assembleias, reuniões, saídas de campo e eventos escolares. O estudo também incluiu pesquisa bibliográfica e documental, colaborando para a obtenção de dados primários. A triangulação entre fontes — entrevistas, observações e documentos — ofereceu maior segurança metodológica na interpretação dos dados, como recomendam Denzin e Lincoln (2006), possibilitando a construção de inferências coerentes e fundamentadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As entrevistas foram avaliadas com base na metodologia de análise de conteúdo proposta por Bardin (1977), possibilitando a organização de forma sistemática dos dados qualitativos, respeitando os princípios de exaustividade, pertinência e objetividade na definição de categorias temáticas.

No processo de codificação e exploração do material, emergiram quatro categorias centrais: **1) Participação e engajamento social na governança das águas:** Os relatos revelaram certo distanciamento entre essas instâncias e a realidade da comunidade escolar, revelando uma presença pontual, marcada por práticas simbólicas de representação. A maioria dos professores não sabia da existência do comitê antes da participação da Unesc na escola. Esse dado evidencia a necessidade de ampliar a divulgação e de fortalecer o engajamento das instituições de ensino em iniciativas voltadas à informação, à gestão ambiental e à preservação dos recursos hídricos.

2) Contribuições das oficinas para a formação de professores: Um dos principais pontos em comum destacados pelos professores foi o aumento do interesse dos alunos após as oficinas. Muitos docentes perceberam que os estudantes passaram a questionar mais sobre o meio ambiente, trazendo reflexões para as aulas e demonstrando interesse em aprofundar os temas abordados.

3) Desafios institucionais e descontinuidade das políticas públicas: Outro aspecto observado refere-se à compreensão de que as ações educativas voltadas à EA ocorrem de forma pontual e carecem de continuidade institucional, o que dificulta sua consolidação no cotidiano escolar. Embora essa percepção não tenha sido explicitamente mencionada nas entrevistas, foi possível identificar uma fragilidade nas práticas de EA na escola, que, em grande medida, dependem de iniciativas externas ou de projetos pontuais para sua realização.

4) Reconhecimento da escola como espaço de mobilização e diálogo: essa categoria destacou a compreensão de que a escola é um espaço estratégico para o diálogo e mobilização social. Revelou também que os participantes reconhecem que o ambiente escolar pode — e deve — ser um território de construção de cidadania e de corresponsabilidade na gestão das águas. Nesse sentido, a análise de conteúdo revelou não apenas os conteúdos manifestos das falas, mas também sentidos políticos, éticos e formativos que emergem da experiência educativa.

Essas categorias não apenas refletem a frequência com que os temas foram abordados nas falas, mas também a intensidade simbólica e crítica com que os sujeitos os expressaram, conforme orienta Bardin (1977) ao destacar a importância dos sentidos latentes nas comunicações analisadas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa concluiu que as oficinas de EA promovidas pelo Comitê de Bacia e executadas pelo ProFor Águas Unesc fortalecem práticas pedagógicas contextualizadas,

participativas e interdisciplinares, estimulando o interesse dos alunos e a articulação dos conteúdos escolares com a realidade local. Entretanto, seus impactos ainda permanecem no âmbito das percepções, uma vez que a descontinuidade das ações, associada à ausência de formação continuada de docentes, à baixa visibilidade dos Comitês e ao insuficiente apoio institucional, tem limitado o engajamento efetivo da sociedade na gestão dos recursos hídricos.

Destaca-se a necessidade de incorporação transversal e permanente da EAC no currículo escolar, aliada a processos formativos contínuos para professores, membros de comitês e lideranças comunitárias, utilizando metodologias práticas, investigativas e contextualizadas. A participação de universidades, como a Unesc, é estratégica para aproximar escolas, comitês e comunidade, promover o diálogo entre saberes e fortalecer a governança participativa. Tal articulação é fundamental para impulsionar políticas públicas permanentes e territorializadas, bem como buscar condições institucionais estáveis e mecanismos de participação social que assegurem o protagonismo da sociedade civil e a sustentabilidade dos recursos hídricos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), pelo apoio institucional em toda formação acadêmica, à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior) pela oportunidade de concessão da bolsa de mestrado, à FAPESC (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina) pelo apoio institucional e incentivo às pesquisas em nossa região.

REFERÊNCIAS

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. 70. ed. Lisboa: Presses Universitaires de France, 1997. 118 p. Tradução de Luis Antero Reto e Augusto Pinheiro.

CAROLA, C.R.; DASSI, N. **Era uma vez o rio Mãe Luzia....** Criciúma, SC: UNESC, 2014. 160 p. ISBN 9788584100002.

DENZIN, N. K.; LINCOLN, Y. S. **O Planejamento da Pesquisa Qualitativa**. Porto Alegre: Artmed, 2006.

DOURADO, M.V.S. **A educação ambiental e as práticas pedagógicas no ensino de jovens e adultos em Formosa - Goiás.** Revista eletrônica UFG / REJ. Volume 14, n2, 2018.

FREIRE, P. **Pedagogia do oprimido.** Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1974.

LOUREIRO, C.F.B. **Educação Ambiental e a formação de sujeitos ecológicos: reflexões e propostas.** São Paulo: Cortez, 2006.

LOUREIRO, C.F.B. Educação Ambiental e Epistemologia. **Rev. Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental.** FURG. v. 32, n.2, p. 159-176, jul./dez. 2015.

MENEZES, C.T. B.; WATERKEMPER, K. Evolução dos Processos de Degradação Ambiental Resultante da Mineração de Carvão em Santa Catarina de 1930-1973 In: **Mineração de Carvão, Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável no Sul de Santa Catarina: uma Abordagem Interdisciplinar.** 1ª ed. Curitiba: Juruá Editora, 2009, único, p. 205-213.

SECCO. AP. L.; NETO, E.S. de C.; NEIMAN, Z. **A Educação Ambiental como ponto de partida nas políticas públicas.** In: *Princípios e Práticas de Educação Ambiental.* Org: Andrea Rabinovici e Zysman Neiman. VeV editora – Diadema – SP. 2022.

VIRTUOSO, J. C.; MENEZES, C. T. B.; ASSUNÇÃO, V. K. **As dinâmicas de poder na apropriação dos recursos hídricos: estudo de caso da bacia hidrográfica do rio Urussanga, SC.** Gaia Scientia., v.14, p.74 - 93, 2020.

VALORIZAÇÃO DE ÓLEOS DE FRITURA USADOS PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL: REVISÃO DE PROCESSOS, ESTUDOS DE CASO E PERSPECTIVAS SUSTENTÁVEIS

Julian Alfredo Cuzco Terrones, Afonso Henrique da Silva Júnior, Luiz Fernando Belchior Ribeiro, José César Ramos Saravia

¹ UTEC/Ingeniería/Bioingeniería

² UFSC/Energia e Sustentabilidades/Engenharia de Energia

Resumo: A valorização de óleos de fritura usados (OFU/WCO) oferece uma solução integrada para problemas ambientais urbanos e para a diversificação da matriz energética. Este resumo expandido apresenta uma revisão crítica de sete estudos (2006–2025) sobre (i) definição e panorama de geração e descarte de OFU; (ii) aplicações potenciais do resíduo; (iii) rotas tecnológicas para conversão em biodiesel com foco em transesterificação; (iv) tipos de catalisadores e estratégias de pré-tratamento para altos teores de ácidos graxos livres; (v) rendimentos e melhorias de processo; (vi) estudos de caso no Brasil e no Peru; e (vii) o uso de inteligência artificial (IA) e avaliação do ciclo de vida (ACV) para otimização técnico-econômica e ambiental. Os resultados indicam que, quando estruturados sistemas de coleta e controle de qualidade são implementados, o biodiesel de OFU atinge rendimentos próximos a 90–95%, com custos de produção até 30–40% inferiores aos de óleos virgens, competitividade ampliada pela valorização da glicerina e por créditos de carbono. Experiências brasileiras demonstram viabilidade logística e inclusão social, enquanto no Peru observa-se potencial de replicabilidade em pequena escala. Ferramentas de IA e ACV têm aprimorado a seleção de parâmetros reacionais e a mensuração de impactos, reforçando os benefícios climáticos e a economia circular. Conclui-se que a integração de políticas públicas, governança logística e inovação em processos permite consolidar o OFU como matéria-prima estratégica para biodiesel e outros bioprodutos.

Palavras-chave: biodiesel; óleo de fritura residual; sustentabilidade; transição energética; waste to energy.

1 INTRODUÇÃO

Óleos de fritura usados (OFU, *waste cooking oil* – WCO) são resíduos urbanos abundantes gerados em domicílios, serviços de alimentação e indústrias. O descarte inadequado em redes de esgoto e corpos hídricos agrava custos de saneamento e poluição: estudos reportam desde efeitos operacionais severos e formações de “bolas de sabão” que obstruem tubulações até elevadas cargas de DQO (até ~3.400.000 mg O₂/L), exigindo volumes expressivos de água para mitigação (Salazar-Campos et al., 2024). Em diferentes contextos, as estimativas de impacto por litro de água são muito grandes, afetando a biodiversidade e a segurança da água potável (Miranda et al., 2018; Salazar-Campos et al., 2024). Ao mesmo tempo, o WCO é um insumo energético com alto teor de carbono, cuja conversão em biodiesel pode reduzir emissões e promover economia circular (Kulkarni; Dalai, 2006; César et al., 2017).

Neste trabalho, estruturamos uma revisão crítica para orientar decisão em políticas e projetos: definimos WCO/OFU e seus impactos, mapeamos aplicações potenciais, detalhamos a produção de biodiesel (com foco em transesterificação), analisamos rendimentos e melhorias de processo, sintetizamos casos no Brasil e no Peru e discutimos como técnicas de inteligência artificial (IA) e avaliação do ciclo de vida (ACV) otimizam a sustentabilidade do sistema (Corral-Bobadilla et al., 2024; Sankhyan et al., 2025).

2 METODOLOGIA

Foi conduzida uma revisão narrativa e comparativa de sete artigos (2006–2025), priorizando: (i) base química e tecnológica da conversão de OFU; (ii) estudos de custos e logística; (iii) métricas ambientais (ACV); e (iv) aplicações de IA à otimização de processos e dinâmica de mercado. As evidências foram organizadas segundo um fluxo temático: conceito de WCO/OFU → descarte e relevância ambiental → aplicações potenciais → produção de biodiesel (rotas, catalisadores, rendimentos) → estudos de caso (Brasil, Peru) → IA e ACV → conclusões e recomendações.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Óleos de fritura usados: composição, descarte e impactos ambientais

Os óleos de fritura usados (OFU/WCO) são misturas de triglicerídeos degradados por processos termolíticos, oxidativos e hidrolíticos, contendo ácidos graxos livres (FFA), polímeros e compostos polares que alteram propriedades físico-químicas e condicionam o pré-tratamento necessário à conversão em biocombustíveis (Kulkarni; Dalai, 2006). A depender do teor de FFA, classificam-se como *yellow grease* (<15% FFA) ou *brown grease* (≥15% FFA), categorias que influenciam diretamente a rota tecnológica. O descarte inadequado em pias, redes de esgoto e corpos hídricos causa sérios impactos, como obstrução de tubulações, aumento da DQO/DBO e custos elevados de tratamento, chegando a contaminar até 20.000 L de água por litro de óleo (Miranda et al., 2018; Salazar-Campos et al., 2024). No Brasil, apenas uma pequena fração é reaproveitada, enquanto no Peru a maior parte ainda é descartada sem controle, evidenciando a urgência de sistemas de logística reversa e cadeias formais de valorização.

3.2 Aplicações potenciais de OFU (além do biodiesel)

Além do biodiesel, o WCO pode originar sabões e detergentes, biolubrificantes, plastificantes, polióis e resinas (inclusive alkyd), graxas, surfactantes (como MES), velas aromáticas e insumos para rejuvenescimento de asfalto, entre outros; há ainda rotas termoquímicas e de reforma a hidrogênio com captura de CO₂ (Sankhyan et al., 2025). Essas cadeias ampliam a captura de valor e complementam a produção de combustível em arranjos de economia circular urbana (Sankhyan et al., 2025; César et al., 2017).

3.3 Produção de biocombustíveis a partir de OFU: panorama

A conversão de OFUs em biodiesel pode ocorrer por diferentes rotas, como a esterificação direta de ácidos graxos livres, a hidroesterificação; a pirólise ou craqueamento

térmico e catalítico, que gera hidrocarbonetos semelhantes ao diesel; e a transesterificação em condições supercríticas, que dispensa catalisadores mas exige maior consumo energético (Sadaf et al., 2018). Apesar dessa diversidade de caminhos, a rota mais difundida e consolidada em escala industrial continua sendo a transesterificação catalítica (Kulkarni; Dalai, 2006; César et al., 2017).

3.4 Transesterificação: catalisadores e condições

Tabela 01 – Tabela de comparação de catalisadores

Tipo de catalisador	Exemplo	Vantagens principais	Limitações/desafios	Rendimento típico (%)
Alcalino (bases)	KOH	Alta taxa de conversão; processo rápido; baixo custo.	Sensíveis a FFA e água, formação de sabão.	90–95% (se FFA < 2%)
Ácido	H ₂ SO ₄	Toleram altos teores de FFA; adequados para pré-tratamento.	Reações mais lentas; maior corrosividade.	80–90% (mesmo c/ FFA alto)
Heterogêneo	CaO	Recuperação e reutilização fáceis; menos geração de resíduos.	Atividade menor que homogêneos; desativação.	85–95%
Enzimático	Lipases	Condições brandas; seletividade alta; produto puro.	Alto custo; estabilidade limitada.	80–95%

Fonte: Kulkarni; Dalai (2006); Sadaf et al. (2018); Sankhyan et al. (2025)

3.5 Rendimentos e melhorias na transesterificação

Com pré-tratamento adequado, o WCO pode alcançar rendimentos médios de 90–95% (Miranda et al., 2018; Sadaf et al., 2018). Estratégias de intensificação, como ultrassom e catálise heterogênea, já superaram 95–98% em diferentes óleos (Sankhyan et al., 2025). Em motores, o biodiesel de WCO apresenta desempenho adequado e menores emissões que o diesel, embora com aumento de NO_x (Kulkarni; Dalai, 2006; Salazar-Campos et al., 2024).

3.6 Casos de estudo: Brasil e Peru

Brasil: i) Baixa participação relativa do WCO na matriz do biodiesel (≈0,5% em 2015), apesar de iniciativas em várias cidades; apenas ~2,5% do óleo produzido teria sido efetivamente reutilizado (César et al., 2017). ii) Na Região Metropolitana de Campinas, plano logístico que acopla reservatórios aos caminhões de coleta domiciliar reduz custos de

transporte e viabiliza produção com rendimentos até ~94%, agregando receitas via venda de glicerina e créditos de carbono (Miranda et al., 2018).

Peru: i) Elevadas cargas orgânicas e impactos de descarte em Lima, com custos de tratamento superiores aos efluentes comuns; ii) grande volume potencial de WCO em restaurantes e alta taxa de descarte inadequado; iii) desafios tecnológicos e regulatórios para escalar a cadeia formal de WCO a biodiesel, mas forte contribuição potencial aos ODS (Salazar-Campos et al., 2024).

3.7 IA e ACV para otimização

Técnicas de IA (aprendizado de máquina + algoritmos genéticos) permitem otimizar simultaneamente razão álcool:óleo, dose de catalisador, temperatura, tempo e agitação, elevando rendimento e HHV enquanto reduzem consumo energético (Corral-Bobadilla et al., 2024). Em condições ótimas ($\approx 1:6,9$ álcool:óleo; ~ 500 rpm; ~ 20 s; ~ 30 °C; $\sim 1\%$ catalisador), reportou-se rendimento máximo de $\sim 97,76\%$ com baixo erro entre predito e experimental; a ACV indicou menor pegada ambiental frente a alternativas, e análises SWOT destacam oportunidades e riscos para a cadeia (Corral-Bobadilla et al., 2024). Estudos de LCA em WCO corroboram que pré-tratamento e transesterificação concentram os principais hotspots, enquanto coleta/transporte tendem a ter contribuição menor (Sankhyan et al., 2025).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A valorização de OFU como matéria-prima para biodiesel é tecnicamente sólida, ambientalmente vantajosa e, quando associada a sistemas de coleta e logística eficientes, também economicamente competitiva. A escolha adequada da rota garante conversões elevadas e produto dentro das normas de qualidade. Experiências brasileiras, como o caso de Campinas, evidenciam ganhos logísticos, inclusão social e receitas adicionais com glicerina e créditos de carbono, enquanto no Peru o potencial de replicabilidade em pequena escala permanece promissor apesar de desafios tecnológicos e regulatórios. O avanço de ferramentas como inteligência artificial e avaliação do ciclo de vida reforça a sustentabilidade do processo, permitindo otimizar parâmetros reacionais e reduzir impactos ambientais. Nesse cenário, recomenda-se fortalecer políticas públicas de coleta e rastreabilidade, capacitar cooperativas, incentivar rotas catalíticas mais sustentáveis e integrar IA e ACV à tomada de decisão. Ao mesmo tempo, estratégias de mercado que valorizem a glicerina e outros coprodutos ampliam a competitividade e consolidam o OFU não apenas como solução para o

descarte inadequado, mas como recurso estratégico para a economia circular e a transição energética na América Latina.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à UTEC, em Lima, Perú, pela oportunidade de realizar o intercâmbio acadêmico, e aos professores José Ramos, Afonso Henrique e Luiz Belchior pela abertura ao diálogo, orientação e apoio. A UFSC é igualmente reconhecida pela acolhida e ambiente de colaboração, que favoreceram a integração de perspectivas internacionais no campo da transição energética.

REFERÊNCIAS

- CÉSAR, Silva; DAYANA ELIZABETH WERDERITS; LEAL, Gabriela; *et al.* The potential of waste cooking oil as supply for the Brazilian biodiesel chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 72, p. 246–253, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116310164>>.
- CORRAL-BOBADILLA, Marina; RUBÉN LOSTADO-LORZA; SABANDO-FRAILE, Celia; *et al.* An artificial intelligence approach to model and optimize biodiesel production from waste cooking oil using life cycle assessment and market dynamics analysis. *Energy*, v. 307, p. 132712–132712, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544224024861>>.
- JOHONATHAN SALAZAR-CAMPOS; SALAZAR-CAMPOS, Orlando ; SALAZAR, Julissa. Prospects and Challenges to Energy Sustainability: The Potential of Frying Oil Biodiesel for Sustainable Development. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, v. 19, n. 7, p. 2549–2557, 2024. Disponível em: <<https://cris.usil.edu.pe/es/publications/prospects-and-challenges-to-energy-sustainability-the-potential-o>>.
- KULKARNI, Mangesh G; DALAI, Ajay K. Waste Cooking Oils: An Economical Source for Biodiesel: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 45, n. 9, p. 2901–2913, 2006. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/ie0510526>>.
- MIRANDA, Amanda Carvalho; FILHO, Silva; TAMBOURGI, Elias Basile; *et al.* Analysis of the costs and logistics of biodiesel production from used cooking oil in the metropolitan region of Campinas (Brazil). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 88, p. 373–379, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211830056X>>.
- SAHAR, None; SADAF, Sana; IQBAL, Javed; *et al.* Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel. *Sustainable Cities and Society*, v. 41, p. 220–226, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670717317249>>.
- SHIVANGI SANKHYAN; KUMAR, Prasun; PANDIT, Soumya; *et al.* Valorization of waste cooking oil: Emerging strategies for bio-based product development. *Biomass and Bioenergy*, v. 202, p. 108244–108244, 2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953425006555>>.

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA PARA SISTEMAS DE GERAÇÃO DE CALOR: SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS CONVENCIONAIS POR HIDROGÊNIO DE BAIXA EMIÇÃO DE CARBONO

Lucas Batista Crepaldi¹, Vinicius Antônio de Oliveira Cosmam², Elaine Virmond³, Elise Sommer Watzko⁴

¹ Universidade Federal de Santa Catarina/Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade/crepaldimt@gmail.com

² Universidade Federal de Santa Catarina/Graduação em Engenharia de Energia/vinicosmam@gmail.com

^{3,4} Universidade Federal de Santa Catarina/Departamento de Energia e Sustentabilidade/elaine.virmond@ufsc.br, elise.sommer@ufsc.br

Resumo: Este estudo avaliou o potencial de transição energética para sistemas de calefação que utilizam combustíveis fósseis como fonte de energia, principalmente o gás natural (GN), por energias alternativas de baixo emissão de carbono, como por exemplo, o hidrogênio (H₂). Para isso, aplicou-se uma metodologia de revisão bibliográfica de caráter descritiva e exploratória utilizando-se as bases de dados Science Direct e Google Scholar, e 19 artigos publicados entre os anos de 2012 e 2025 foram selecionados. Os resultados analisados demonstraram uma predominância em estudos computacionais de simulação, modelagem e fluidodinâmica. Estima-se que a preferência por este tipo de estudo está relacionada ao menor custo de operação e a uma maior aplicabilidade quando comparados a experimentos físicos e laboratoriais. Verificou-se, também, a utilização de técnicas avançadas computacionais, como Machine Learning (ML) e Inteligência Artificial (IA), voltadas à otimização de cálculos complexos existentes em sistemas de combustão. Em suma, os trabalhos analisados demonstraram que a aplicação de H₂ para calefação converge para o aumento da eficiência energética residencial, reduzindo significativamente as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Conclui-se, contudo, que a viabilidade da sua implementação depende não apenas de fatores técnicos e ambientais, mas também de questões econômicas e de aceitação social.

Palavras-chave: Hidrogênio, Calefação, Conforto Térmico, Sustentabilidade, Sistemas de Combustão.

1 INTRODUÇÃO

No setor residencial brasileiro, a eletricidade é a fonte de energia mais consumida, representando 48% do consumo total. (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2024). Diferente do Brasil, a Europa, por exemplo, utiliza grande parte da sua energia residencial para aquecimento. Segundo os dados da União Europeia, utilizam-se 77,6% para aquecimento, sendo utilizado majoritariamente o GN como combustível (EUROPEAN UNION, 2025), contribuindo consideravelmente para o aumento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Nesse contexto, busca-se uma alternativa energética que possa substituir o GN, garantindo a redução dos GEE e, preferencialmente, oriunda de fontes renováveis. Nesse contexto entra o hidrogênio (H₂), um combustível promissor, limpo e sustentável, que produz água como subproduto principal, resultando num impacto ambiental mínimo e em zero emissões de GEE (HABIB *et al.*, 2024)

2 METODOLOGIA

Abordou-se o estudo de forma descritiva e exploratória, através do embasamento em estudos bibliográficos. Definiu-se a pesquisa como uma revisão literária, realizada por meio de artigos científicos das bases de dados Science Direct e Google Scholar. As palavras-chave utilizadas foram: “hydrogen combustion modeling”, “simulation and modeling of

hydrogen combustion”, *“hydrogen boiler combustion*”, *“house heating with hydrogen*” e *“residential, commercial, and industrial hydrogen applications*”, considerando trabalhos publicados entre os anos 2012 e 2025. Os critérios de inclusão envolveram: (1) artigos de modelagem e simulação de combustão do hidrogênio; (2) modelagem 1D/3D de sistemas de combustão de hidrogênio; (3) estudos de caldeiras residenciais que utilizam hidrogênio; (4) modelos químicos de reação de combustão de gases.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A revisão bibliográfica resultou na seleção de 19 artigos científicos e é apresentada na Tabela 1. Nela são comparados 14 artigos de modelagem e simulação de sistemas com combustão de hidrogênio, 2 artigos que integram experimento com modelagem e 3 artigos de revisão e/ou avaliação da aceitação socioeconômica desses.

Tabela 01 – Resumo comparativo dos artigos selecionados.

Artigo (Autor/Ano)	O que foi avaliado	Respostas obtidas
Thavlov e Bindner (2012)	Previsão de temperatura e consumo energético residencial.	Modelo prevê temperatura interna com precisão de 1°C/hora.
Olm et al. (2014)	Desempenho de 19 mecanismos de combustão de hidrogênio.	Kéromnès-2013 é o melhor mecanismo geral para combustão de H ₂ .
Li et al. (2017)	Estrutura de chama e calor de H ₂ em microqueimadores a jato.	H ₂ queima estável; calor e comprimento da chama aumentam.
Rao e Ukil (2020)	Modelagem semilinear da dinâmica de temperatura em edifícios.	Modelo de 3ª ordem concordou excelentemente com simulações CFD.
Xin et al. (2021)	Combustão de gás natural com H ₂ em caldeiras; temperatura e gases.	H ₂ -GN atende requisitos; aumenta temperatura e zona quente.
Maslyanitsyn et al. (2021)	Modelo linear de interação térmica em estruturas multicamadas.	Modelo linear útil para controle automático de regimes térmicos.
Gal et al. (2024)	Modelagem H ₂ (0D/1D/3D-CFD): LFS e IDT sob condições de motor.	LFS e IDT variam; simulações calibradas concordam com testes.
Millán-Merino e Boivin (2024)	Mecanismo de uma etapa para combustão de H ₂ : chama e autoignição.	Mecanismo reduz rigidez, prevê temperaturas e LFS com precisão.
Elkhatib et al. (2024)	Otimização dinâmica de H ₂ em unidade MCHP residencial.	Modelos da célula a combustível e MCHP validados experimentalmente.
Varlamov et al. (2024)	Eficiência de CHGM residencial operando com hidrogênio.	Eficiência de 106% observada para CHGM residencial a H ₂ .
Gordon et al. (2024)	Aceitação e adoção de casas a H ₂ por consumidores do Reino Unido.	Confiança e segurança influenciam positivamente a aceitação do H ₂ .
Yaïci e Longo (2025)	Desempenho de caldeiras domésticas com HENG e H ₂ puro.	Modelos de caldeiras validados com baixa margem de erro.
Shibani et al. (2025)	Integração de H ₂ de baixo carbono em comunidades H ₂ puro.	Cenário ótimo para VPL/mitigação GEE.
Heidarnejad et al. (2025)	Modelagem termoeconômica e otimização de CHP com H ₂ .	Sistema ótimo identificado; modelos do eletrolisador e PV validados.
Kosyanchuk (2025)	Modelo ANN para cinética química de combustão H ₂ -ar.	Rede neural otimizada para precisão e velocidade em combustão H ₂ .
Allal et. al (2025)	Aplicações de Machine Learning em sistemas de energia de H ₂ .	Revisão aborda ML para otimização de produção e uso de H ₂ .
Di Gaeta e Giglio (2025)	Modelagem polinomial da Velocidade Laminar da Chama de	Modelos ótimos (M_AIC, M_BIC) com alta precisão preditiva.

	H ₂ -O ₂ -H ₂ O.	
Esmaeili (2025)	Impacto de modelos (turbulência, combustão, radiação) em chamas metano-H ₂ .	SAS e flamelet foram mais precisos; radiação melhorou previsões.
Muto (2025)	Modelos químicos tabulados (FPV) para simulações de combustão.	FPV aplicado com sucesso; ANN reduz banco de dados com precisão.

Fonte: Autores.

A análise dos artigos revela a clara predominância de metodologias numérica, que incluem simulação, modelagem matemática e fluidodinâmica computacional (CFD). Tais metodologias são amplamente empregadas para explorar diversas condições de contorno, detalhamento dos fenômenos e no desenvolvimento de modelos preditivos, possuindo um maior custo-benefício quando comparado a experimentos. Os estudos que abordam somente experimentos são escassos, indicando a falta de análises abrangentes e de resultados validados. Observa-se a crescente tendência da aplicação de recursos computacionais, como Inteligência Artificial (IA) e Machine Learning (ML), para a otimização e aceleração de cálculos complexos nos sistemas de combustão de H₂. Em questão de resultados apresentados, o estudo de Elkhatib et al. (2024) é o mais relevante para a demanda abordada nesta pesquisa, pois investiga diretamente a otimização de uma unidade micro-cogeneradora híbrida (MCHP) de caldeira-célula a combustível para residências, abordando o uso de H₂ para suprir as demandas térmicas residenciais.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Deste estudo preliminar, conclui-se que, para a aplicação do H₂ em estruturas existentes, é necessário não só considerar as questões econômicas e ambientais, mas também a aceitação social perante a transição energética. Os resultados apresentados ao longo dos artigos demonstram que caldeiras residenciais apresentam uma maior eficiência quando enriquecidas com H₂. A modelagem matemática, junto da simulação, está fortemente presente, assumindo um papel fundamental nos estudos voltados à aplicação de H₂ para calefação. A capacidade dessa ferramenta em otimizar processos, reduzir custos e se torna essencial para o futuro da engenharia térmica e energética.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo (processo 88887.143351/2025-00) e à empresa Hidro Industrial Ltda.

REFERÊNCIAS

- ALLAL**, Zaid et al. A review on machine learning applications in hydrogen energy systems. **International Journal of Thermofluids**, v. 26, p. 101119, 2025. DOI: 10.1016/j.ijft.2025.101119.
- DI GAETA**, Alessandro; **GIGLIO**, Veniero. Robust multivariate polynomial modeling of Laminar Flame Speed of Hydrogen–Oxygen–Steam mixtures supporting simulation applications in sustainable combustion. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 129, p. 161–171, 2025. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.03.331.
- ELKHATIB**, Rafik; **PETRONE**, Raffaele; **LOUAHLIA**, Hasna. Dynamic study of hydrogen optimization in the hybrid boiler-fuel cells MCHP unit for eco-friendly house. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 56, p. 973–988, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.12.240.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Atlas da Eficiência Energética Brasil 2024: Relatório de Indicadores**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-de-eficiencia-energetica-brasil-2024>. Acesso em: 28 jul. 2025.
- ESMAEILI**, Mostafa. Impact of Turbulence, Combustion, and Radiation Models on RANS-Based Simulation of Methane–Hydrogen Diffusion Flames. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 2025. DOI: 10.1007/s13369-025-09968-0.
- EUROPEAN UNION. EUROSTAT. **European households' energy consumption: space heating accounts for 60%**. Luxemburgo: Eurostat, 25 jun. 2025. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250625-2>. Acesso em: 28 jul. 2025.
- GAL**, Thomas et al. Modeling of Hydrogen Combustion from a 0D/1D Analysis to Complete 3D-CFD Engine Simulations. **Energies**, v. 17, n. 22, p. 5543, 2024. DOI: 10.3390/en17225543.
- GORDON**, Joel A. et al. Modelling the innovation-decision process for hydrogen homes: An integrated model of consumer acceptance and adoption intention. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 94, p. 554–579, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.11.061.
- HABIB**, Mohamed A.; **ABDULRAHMAN**, Gubran A. Q.; **ALQUAITY**, Awad B. S.; **QASEM**, Naef A. A. Hydrogen combustion, production, and applications: A review. **Alexandria Engineering Journal**, v. 100, p. 182-207, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.030>. Acesso em: 24 maio 2024.
- HEIDARNEJAD**, Parisa; **FATHI**, Parsa; **KARAMI**, Maryam. Thermoeconomic modeling and artificial neural network-based optimization of a decarbonized combined heat and power plant with hydrogen re-electrification. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 143, p. 1318–1329, 2025. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.486.
- KOSYANCHUK**, Vasily. A Neural Network-Based Model for Hydrogen–Air Combustion. **International Journal of Computational Methods**, v. 22, n. 7, p. 2450092, 2025. DOI: 10.1142/S0219876224500920.

LI, Jun; **HUANG**, Hongyu; **KOBAYASHI**, Noriyuki. Hydrogen combustion as a thermal source. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED ENERGY, 9., 2017, Cardiff, UK. **Energy Procedia**, v. 142, p. 1083–1088, 2017. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.360.

MASLYANITSYN, A. P.; **GALITSKOV**, K. S.; **FADEEV**, A. S. Mathematical modeling of thermal processes in building enclosures. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE INTERSTROYMEH (ISM 2020), 2020. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1103, p. 012019, 2021. DOI: 10.1088/1757-899X/1103/1/012019.

MILLÁN-MERINO, Alejandro; **BOIVIN**, Pierre. A new single-step mechanism for hydrogen combustion. **Combustion and Flame**, v. 268, p. 113641, 2024. DOI: 10.1016/j.combustflame.2024.113641.

MUTO, Masaya. Tabulated Chemistry Models for Numerical Simulation of Combustion Flow Field. **Fluids**, v. 10, n. 4, p. 83, 2025. DOI: 10.3390/fluids10040083.

OLM, Carsten et al. Comparison of the performance of several recent hydrogen combustion mechanisms. **Combustion and Flame**, v. 161, p. 2219–2234, 2014. DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.03.006.

RAO, D. M. K. K. Venkateswara; **UKIL**, Abhisek. Modeling of Room Temperature Dynamics for Efficient Building Energy Management. **IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Systems**, 2020. DOI: 10.1109/TSMC.2017.2758766.

SHIBANI et al. Assessment of low-carbon hydrogen integration into natural gas energy systems beyond blending: An analysis of pure H₂ communities in a natural gas-dependent region. **Journal of Cleaner Production**, v. 518, p. 145869, 2025. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145869.

THAVLOV, Anders; **BINDNER**, Henrik W. Thermal Models for Intelligent Heating of Buildings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED ENERGY, ICAE 2012, 2012, Suzhou, China. **Proceedings of the International Conference on Applied Energy, ICAE 2012**. Suzhou, China, 2012. p. A10591.

VARLAMOV, Gennagii B. et al. Hydrogen energy for advancing energy efficiency and environmental friendliness of the heat supply system of residential house. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 64, p. 103689, 2024. DOI: 10.1016/j.seta.2024.103689.

XIN, Yue et al. Numerical Simulation of Combustion of Natural Gas Mixed with Hydrogen in Gas Boilers. **Energies**, v. 14, n. 21, p. 6883, 2021. DOI: 10.3390/en14216883.

YAÏCI, Wahiba; **LONGO**, Michela. Performance analysis of domestic boilers fuelled with hydrogen-enriched natural gas blends and pure hydrogen. **Energy**, v. 322, p. 135536, 2025. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135536.

DESEMPENHO DE LONGO PRAZO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM CLIMAS EUROPEUS: ESTUDO DE DELFT E BRATISLAVA (2010-2024)

Diowana Mello de Oliveira¹, Giuliano Arns Rampinelli²

¹ Universidade Federal de Santa Catarina / Departamento de Projetos PIBIC/Cnpq / Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica – PV / diowana.mello2018@gmail.com

² Universidade Federal de Santa Catarina / Departamento de Energia e Sustentabilidade / EES/CTS/ARA/ Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica – PV / giulianorampinelli@gmail.com

Resumo: Os sistemas fotovoltaicos vêm se consolidando como a principal fonte de expansão da geração distribuída no Brasil, em razão do elevado potencial de radiação solar, da maturidade tecnológica, da regulamentação e da redução dos custos de instalação, operação e manutenção. Este trabalho tem por objetivo apresentar uma análise comparativa do desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR), localizados em Delft na Holanda e Bratislava na Eslováquia. A metodologia baseou-se na análise dos parâmetros elétricos entre os anos de 2010 e 2024 e na determinação de indicadores de desempenho, como a Produtividade do Sistema (YF), Produtividade de Referência (YR) e Razão de Desempenho (PR), a partir de dados experimentais e históricos obtidos na plataforma PVSpot. Os resultados demonstraram que os sistemas europeus alcançam elevado desempenho global, refletindo maior maturidade tecnológica e eficiência operacional. A utilização de índices de mérito permite identificar perdas, comparar diferentes sistemas e fornecer subsídios para o dimensionamento e a operação de sistemas fotovoltaicos em distintas condições climáticas e geográficas. Para o SFCR da Escola Secundária de Engenharia Elétrica localizada em Bratislava na Eslováquia, a produtividade do sistema foi de 1151,6 kWh/kWp por ano enquanto a produtividade de referência foi de 1285,1 kWh/kWp e a média anual da razão de performance foi de 0,79. Para o SFCR da Universidade de Tecnologia de Delft na Holanda, a produtividade do sistema foi de 1016,6 kWh/kWp por ano enquanto a produtividade de referência foi de 1473,0 kWh/kWp e ainda, a média anual da razão de performance foi de 0,80.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Sistema Fotovoltaico, Indicadores de Desempenho, Geração Distribuída.

1 INTRODUÇÃO

A Energia Solar Fotovoltaica consolidou-se como vetor de expansão da geração distribuída e da transição energética, impulsionada pela maturidade tecnológica dos módulos e inversores, pela redução de custos e pela disponibilidade de dados de monitoramento em ambientes reais de operação. Em contextos europeus, a diversidade climática e geográfica exige avaliações comparativas que ultrapassem métricas pontuais e permitam entender como diferentes regimes de irradiância solar, temperatura e operação impactam o desempenho ao longo do tempo. Nesse cenário, análises baseadas em séries históricas extensas tornam-se essenciais para qualificar decisões de projeto, operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, bem como para fundamentar políticas de eficiência e confiabilidade.

Este estudo apresenta uma avaliação comparativa de longo prazo do desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), considerando dois contextos climáticos europeus distintos Delft na Holanda e Bratislava na Eslováquia no período de 2010 a 2024. A metodologia utiliza dados experimentais e históricos da plataforma PVSpot e indicadores consagrados de desempenho, Produtividade do Sistema (YF), Produtividade de Referência (YR) e Razão de Desempenho (PR). Ao quantificar

produtividade e perdas e ao comparar comportamentos entre locais com diferentes condições ambientais e operacionais, o trabalho busca oferecer evidências aplicáveis ao dimensionamento, à operação e à manutenção de sistemas fotovoltaicos, contribuindo para práticas de engenharia mais eficientes e para o aprimoramento de benchmarks de desempenho em cenários climáticos diversos.

2 METODOLOGIA

A produtividade do sistema (Y_F) é a razão entre a energia elétrica gerada e a potência instalada. Esse índice pode ser calculado tanto para uma configuração específica de módulos quanto para o sistema como um todo, este é dito rendimento final e indica o número de horas que o sistema deveria operar, em sua potência nominal, para fornecer a mesma energia (Rampinelli, 2010).

Este índice normaliza a energia elétrica gerada em relação a capacidade do sistema; ideal para comparar a energia produzida por sistemas fotovoltaicos de tamanhos diferentes. A Equação (1) define Y_F , onde $\int PCA(t)dt$ é a energia gerada real em kWh e $PSTD$ é a potência instalada em kWp.

$$Y_F = \frac{\int PCA(t) dt}{P_{STD}} \quad (2)$$

A Produtividade de Referência (Y_R) é também chamada de rendimento de referência, i.e., a razão entre a irradiação solar no plano dentre de um período considerado pela irradiância de referência, que representa a irradiância de referência na condição padrão de testes, sendo igual a 1.000 W/ m² (Equação 2). Tem-se então Y_R como o número de horas de pico de sol ou a irradiação solar em unidades de kWh/m².

$$Y_R = \frac{\text{Energia solar incidente no plano dos módulos (kWh/m}^2\text{)}}{\text{Irradiância padrão (kW/m}^2\text{)}} = \text{horas} \quad (2)$$

O Desempenho Global ou Performance Ratio (PR) é o índice de mérito que demonstra a real capacidade do sistema em converter a energia solar disponível no plano do módulo fotovoltaico em energia elétrica, ou seja, é a razão entre a energia entregue pelo sistema e a energia que esteve disponível no plano ali considerado (Rampinelli, 2010), a qual está representada pela Equação (3).

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (3)$$

O mesmo quantifica as perdas que houveram no sistema devido à ineficiência do inversor, como perdas por dissipação ou incompatibilidades na conversão CC para CA e eventuais desligamentos (Tonolo, 2019). O índice PR é extremamente útil para avaliar sistemas fotovoltaicos conectados à rede inseridos em diferentes latitudes.

A diferença do índice PR entre dois ou mais sistemas fotovoltaicos, não reflete a real capacidade de produção de energia elétrica, a presença de um PR alto não significa maior produção de energia quando comparado a um sistema com baixo PR, um sistema pode produzir altos valores de energia elétrica mesmo apresentando um índice de desempenho global baixo, isto se deve principalmente a presença de altas taxas de incidência solar no local de inserção do arranjo fotovoltaico.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede utilizados para este estudo estão descritos na Tabela 1, sendo que o sistema FV localizado na Universidade de Tecnologia de Delft tem potência instalada de 15,24 kWp e uma base histórica de dados de 2011 a 2024, enquanto o SFCR da Escola Secundária de Engenharia Elétrica na Bratislava tem potência nominal de 19,1 kWp e possui dados de 2010 a 2024.

Tabela 01 – Características dos Sistemas FV Estudados neste trabalho.

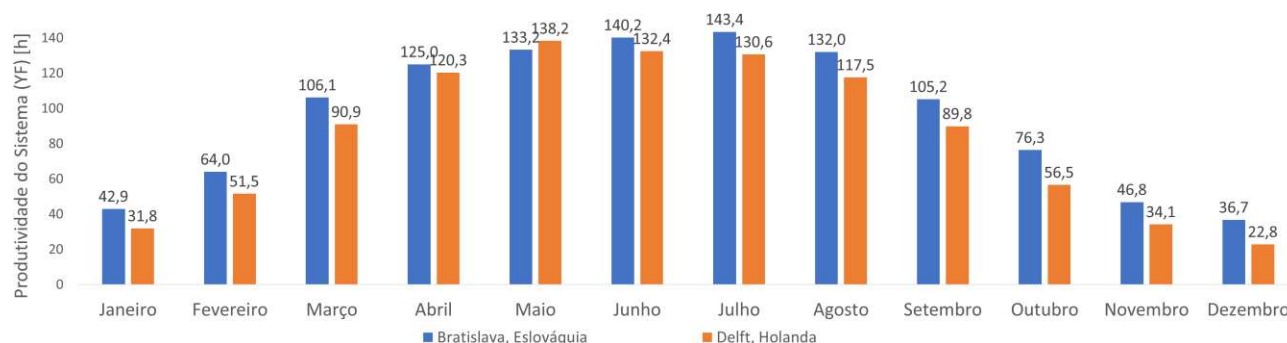
	Bratislava, Eslováquia	Delft, Holanda
Descrição	Escola Secundária de Engenharia Elétrica	Universidade de Tecnologia de Delft
Potência Instalada	19,10 kWp	15,24 kWp
Latitude e Longitude	51,99°N, 4,37°L	48,19°N, 17,03°L
Azimute/ Inclinação	180°/30°	180°/26°
Média da Máxima Irradiação anual ao dia	6,17 kWh/m ² dia	5,70 kWh/m ² dia
Período analisado	2010-2024	2011-2024

Fonte: Elaborado pela autora.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fig. 1 destaca que o sistema da cidade de Bratislava apresenta o maior índice de produtividade do sistema (YF) em julho, com produtividade de 143,4 kWh/kWp. Para o sistema localizado na cidade de Delft o maior índice YF registrado foi de 138,2 kWh/kWp, fazendo referência ao mês de maio, inclusive, é o único mês em que superou os índices referente a Bratislava. A menor produtividade é registrada nos meses condizentes com o inverno europeu, para ambos os sistemas fotovoltaicos, o menor índice YF foi registrado no mês de dezembro, o sistema da Bratislava apresentou 36,7 kWh/kWp e o sistema de Delft apresentou 22,8 kWh/kWp, refletindo a irradiância daquele mês.

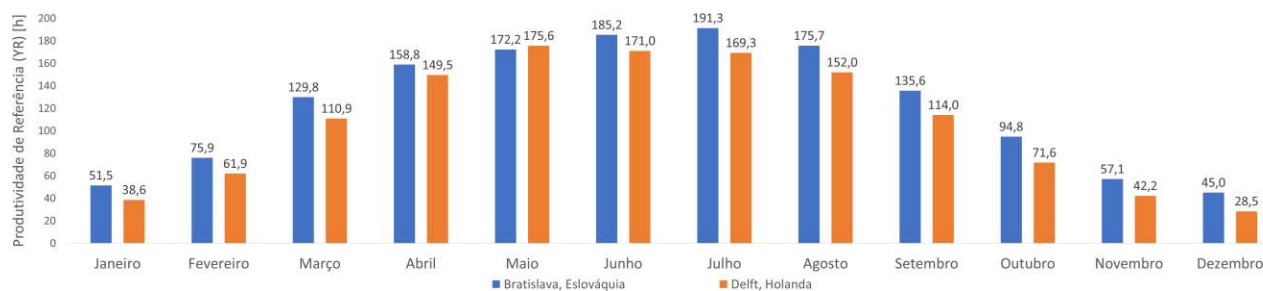
Figura 01 – Média Mensal da Produtividade do Sistema (YF) Para Bratislava (Eslováquia) e Delft (Holanda).



Fonte: Elaborado pela autora

Na fig.2, a análise dos dados evidencia que, quando comparadas, as localidades europeias, Delft na Holanda e Bratislava na Eslováquia, observa-se os menores valores entre 28,5h em dezembro em Delft e 45h em Bratislava, já a máxima produtividade de referência foi de 191,3h no mês de julho para a Bratislava, esta que se destaca em todos os meses comparada a Delft, exceto no mês de maio.

Figura 02 – Média Mensal da Produtividade de Referência (YR) Para Bratislava (Eslováquia) e Delft (Holanda).



Fonte: Elaborado pela autor.

Os maiores índices de razão de desempenho estão presentes nos meses que apresentam menores temperaturas nestas cidades, ou seja, nos meses de novembro a março.

Figura 03 – Média Mensal da Razão de Desempenho (*PR*) Para Bratislava (Eslováquia) e Delft (Holanda).



Fonte: Elaborado pela autora

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou o desempenho de sistemas fotovoltaicos por meio de uma abordagem de múltiplos índices energéticos, com análise mensal ao longo do ano e atualização dos principais indicadores de desempenho: Produtividade do Sistema (*YF*), Produtividade de Referência (*YR*) e Razão de Desempenho (*PR*). A comparação entre contextos climáticos europeus distintos permitiu identificar padrões de produtividade e perdas, oferecendo subsídios objetivos para dimensionamento, operação e manutenção.

Os resultados indicam, para o sistema FV da Escola Secundária de Engenharia Elétrica em Bratislava, *YF* anual de 1151,6 kWh/kWp, *YR* de 1285,1 kWh/kWp e *PR* médio anual de 0,79. Para o sistema FV da Universidade de Tecnologia de Delft, observou-se *YF* anual de 1016,6 kWh/kWp, *YR* de 1473,0 kWh/kWp e *PR* médio anual de 0,80. Em síntese, Bratislava apresentou maior produtividade anual do sistema, enquanto Delft registrou maior produtividade de referência, com razões de desempenho semelhantes entre os locais. Esses achados reforçam a utilidade de uma avaliação por múltiplos índices para distinguir efeitos climáticos e operacionais e apoiar decisões de engenharia em diferentes cenários.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia e Sustentabilidade (PPGES), ao Núcleo de Tecnologias Elétricas (NTEEL), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à plataforma PVSpot, pelo suporte técnico, acadêmico e institucional que possibilitou a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

RAMPINELLI, Giuliano Arns. **Estudo de Características Elétricas e Térmicas de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede**. 2010. 285 f. Tese – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

TONOLO, Édwin Augusto. **Análise dos Fatores de Perdas nos Sistemas Fotovoltaicos da UTFPR campus Curitiba**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [Curitiba], 2019. Acesso em: 04 set. 2025.