

Antonio Nunes de Oliveira
Auzuir Ripardo de Alexandria
Bruno César Barroso Salgado
Francisco Frederico dos Santos Matos
Glendo de Freitas Guimarães
João Carlos Da Costa Assunção
Sandro César Silveira Jucá
(organizadores)

Avanços em Energias Renováveis



Avanços em Energias Renováveis

Conselho Editorial da LF Editorial

Amílcar Pinto Martins — Universidade Aberta de Portugal

Arthur Belford Powell — Rutgers University, Newark, USA

Carlos Aldemir Farias da Silva — Universidade Federal do Pará

Emmánuel Lizcano Fernandes — UNED, Madri

Iran Abreu Mendes — Universidade Federal do Pará

José D'Assunção Barros — Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Luis Radford — Universidade Laurentienne, Canadá

Manoel de Campos Almeida — Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Maria Aparecida Viggiani Bicudo — Universidade Estadual Paulista — UNESP/Rio Claro

Maria da Conceição Xavier de Almeida — Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Maria do Socorro de Sousa — Universidade Federal do Ceará

Maria Luisa Oliveras — Universidade de Granada, Espanha

Maria Marly de Oliveira — Universidade Federal Rural de Pernambuco

Raquel Gonçalves-Maia — Universidade de Lisboa

Teresa Vergani — Universidade Aberta de Portugal

Antonio Nunes de Oliveira
Auzuir Ripardo de Alexandria
Bruno César Barroso Salgado
Francisco Frederico dos Santos Matos
Glendo de Freitas Guimarães
João Carlos Da Costa Assunção
Sandro César Silveira Jucá
(Organizadores)

Avanços em Energias Renováveis



Copyright © 2024 Editora Livraria da Física

1a. Edição

Editores: VÍCTOR PEREIRA MARINHO e JOSÉ ROBERTO MARINHO
Projeto gráfico e diagramação: THIAGO AUGUSTO SILVA DOURADO
Capa: FABRÍCIO RIBEIRO

Texto em conformidade com as novas regras ortográficas do Acordo da Língua Portuguesa.

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

Avanços em energias renováveis / organização Antonio Nunes de Oliveira...[et al.] -- São Paulo : LF Editorial, 2024.

Vários autores.

Outros organizadores: Auzuir Ripardo de Alexandria, Bruno César Barroso Salgado, Francisco Frederico dos Santos Matos, Glendo de Freitas Guimarães, João Carlos da Costa Assunção, Sandro César Silveira Jucá.

Bibliografia.

ISBN 978-65-5563-522-5

1. Fontes energéticas renováveis 2. Hidrogênio 3. Inovações tecnológicas 4. Recursos naturais renováveis 5. Sustentabilidade I. Oliveira, Antonio Nunes de. II. Alexandria, Auzuir Ripardo de. III. Salgado, Bruno César Barroso. IV. Matos, Francisco Frederico dos Santos. V. Guimarães, Glendo de Freitas. VI. Assunção, João Carlos Da Costa. VII. Jucá, Sandro César Silveira.

24-242805

CDD-621.042

Índices para catálogo sistemático:

1. Fontes energéticas renováveis : Engenharia 621.042

Eliane de Freitas Leite – Bibliotecária – CRB 8/8415

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida sejam quais forem os meios empregados sem a permissão da Editora. Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107 da Lei n. 9.610, de 19 de fevereiro de 1998.

Impresso no Brasil

Printed in Brazil



www.lfeditorial.com.br

Visite nossa livraria no Instituto de Física da USP

www.livrariadafisica.com.br

Telefones:

(11) 2648-6666 | Loja do Instituto de Física da USP

(11) 3936-3413 | Editora

Se o seu dom é servir, sirva; se é ensinar, ensine; se é dar ânimo, que assim faça; se é contribuir, que contribua generosamente; se é exercer liderança, que a exerça com zelo; se é mostrar misericórdia, que o faça com alegria.

Romanos 12:7-8

Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET), à Rede Nordeste de Ensino (RENOEN), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), projeto UNI-0210-00699.01.00/23.

Prefácio

Com grande satisfação, apresentamos esta obra em comemoração aos 10 anos do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) do Instituto Federal do Ceará (IFCE). Durante esta década, pesquisadores de diferentes especialidades uniram esforços para promover avanços na geração de tecnologias limpas e no fortalecimento das energias renováveis, criando um ambiente fértil para inovação científica e sustentabilidade. Esta publicação é um reflexo desse empenho conjunto, reunindo contribuições de docentes e discentes que exploraram, de forma colaborativa, temas fundamentais para o desenvolvimento sustentável.

Neste contexto de transição energética e busca por soluções sustentáveis, o programa de Mestrado tem se destacado como um espaço para pesquisas que promovem a inovação tecnológica e a preservação do meio ambiente, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Os estudos aqui reunidos abordam desde novas fontes de energia até o aprimoramento de materiais e sistemas inovadores.

No primeiro capítulo, “Hidrogênio Verde – Um Combustível Limpo para o Futuro”, explora-se o potencial do hidrogênio como alternativa energética sustentável, detalhando suas propriedades, formas de produção e os desafios de implementação. O segundo capítulo, “Poluição de Corpos Hídricos por Fármacos: Lignina Kraft como Alternativa Sustentável na Adsorção de Contaminantes”, examina o uso de lignina kraft como solução bioadsorvente para combater a poluição causada por resíduos farmacêuticos, promovendo uma abordagem mais ecológica e eficiente. “Utilização dos Resíduos Gerados na Produção de *Oreochromis Niloticus* como Fertilizante no Cultivo de Girassol”, o terceiro capítulo, ilustra a sinergia entre sustentabilidade e agroindústria, ao investigar a reutilização de resíduos para fertilização. Já o quarto capítulo, “Inibidores de Corrosão”, explora compostos naturais que aumentam a durabilidade dos materiais, demonstrando sua relevância em ambientes agressivos. A eficiência e durabilidade das “Células Fotovoltaicas

de Silício Policristalino: Defeitos Microestruturais e Sua Caracterização” são abordadas no quinto capítulo, enquanto o sexto capítulo, “Aplicação de Robótica em Energias Renováveis”, foca nas contribuições tecnológicas da robótica para o setor energético. “Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal de Pequeno Porte: Estudos Aerodinâmicos” explora, no sétimo capítulo, formas de otimização de turbinas para geração em pequena escala. Por fim, o oitavo capítulo, “Utilização de Sedimentos de Lagoa como Fertilizante no Cultivo de Girassol”, reafirma o potencial de reciclagem de materiais naturais para o cultivo sustentável.

Cada capítulo reflete o compromisso e o rigor científico dos pesquisadores envolvidos, reafirmando a dedicação do PPGER ao desenvolvimento sustentável. Esperamos que esta obra inspire futuras gerações e fortaleça a presença das energias renováveis na construção de um mundo mais equilibrado e ecologicamente responsável. Que este marco seja não apenas um reflexo de nossas conquistas, mas também um convite para novas inovações no campo das energias renováveis.

BRUNO CÉSAR BARROSO SALGADO
Coordenador do PPGER

Sumário

Agradecimentos	VII
Prefácio	IX
1 Hidrogênio Verde – Um Combustível Limpo para o Futuro <i>Erick França Oliveira, Matheus Freire Porto e Bruno César Barroso Salgado</i>	1
2 Poluição de corpos hídricos por fármacos: lignina kraft como alternativa sustentável na adsorção de contaminantes <i>Lázaro Henrique Pereira e Francisco Avelino</i>	15
3 Utilização dos resíduos gerados na produção de <i>Oreochromis Niloticus</i> como fertilizante no cultivo de girassol <i>Francisco Ícaro Carvalho Aderaldo e Franklin Aragão Gondim</i>	29
4 Inibidores de Corrosão <i>Antonio Jonatas da Silva Barros e Marcelo Monteiro Valente Parente</i>	37
5 Células fotovoltaicas de silício policristalino: defeitos microestruturais e sua caracterização <i>Caio Façanha de Oliveira e Francisco Nélio Costa Freitas</i>	47
6 Aplicação de Robótica em Energias Renováveis <i>Daniela Cadore Vale e Auzuir Ripardo de Alexandria</i>	63
7 Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal de Pequeno Porte: Estudos Aerodinâmicos <i>Izamaro de Araújo e Francisco Frederico dos Santos Matos</i>	71

7	Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal de Pequeno Porte: Estudos Aerodinâmicos	
	<i>Izamaro de Araújo e Francisco Frederico dos Santos Matos</i>	71
8	Utilização de sedimentos de lagoa como fertilizante no cultivo de girassol	
	<i>Tiago de Abreu Lima e Franklin Aragão Gondim</i>	95
	Posfácio	103
	Sobre os autores	105
	Sobre os organizadores	113

1

Hidrogênio Verde – Um Combustível Limpo para o Futuro

Erick França Oliveira¹, Matheus Freire Porto¹ e Bruno César Barroso Salgado¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE,
Campus de Maracanaú, Brasil

1 Introdução

A necessidade de alternativas energéticas, limpas e sustentáveis torna-se cada vez mais indispensável diante dos desafios climáticos globais. Em resposta às crescentes preocupações ambientais, a sociedade global está entrando em uma nova era focada na geração de energia limpa e renovável. O setor energético está no início de uma nova era industrial, marcada pela fabricação de tecnologias de energia limpa [IEA, 2023].

Nos últimos anos, essas fontes de energia têm apresentado um crescimento significativo, refletindo o auge da transição global em direção a sistemas mais sustentáveis [IEA, 2022a]. Nesse contexto, o hidrogênio tem ganhado destaque significativo, impulsionado principalmente por suas propriedades, como alta densidade energética e baixas emissões de carbono, tornando-se capaz de desempenhar um papel fundamental nesse momento de transição energética. Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos relacionados ao hidrogênio, abordando questões como a produção de hidrogênio sustentável, sistemas de transporte, armazenamento e a produção de produtos químicos verdes.

Este capítulo oferece uma visão abrangente do hidrogênio verde, desde suas propriedades e características até as rotas de produção mais eficientes e sustentáveis. Abordaremos também as vantagens e desvantagens desse vetor energético, explorando seu potencial para transformar o sistema energético global.

2 O Hidrogênio: Propriedades e Características

A busca por alternativas energéticas limpas e sustentáveis se torna cada vez mais urgente diante dos desafios climáticos globais. Nesse cenário, o hidrogênio verde surge como um vetor energético promissor, com potencial para descarbonizar diversos setores da economia, incluindo transporte, indústria e geração de energia [IEA, 2023, IPCC, 2021].

O hidrogênio (H_2) oferece uma alternativa competitiva aos combustíveis fósseis, podendo ser fundamental para o processo de descarbonização. Apesar de ser o elemento mais abundante do universo e o quarto mais abundante da Terra, ele é raramente encontrado em sua forma molecular pura (H_2) constituída por dois átomos de hidrogênio com ligação covalente e geometria molecular linear, tornando suas moléculas apolares e propensas a interações dipolo induzido. Na natureza, ele é encontrado combinado com outros átomos, como na água e em hidrocarbonetos [LOPES, 2021, MACHADO, 2020, BEZERRA, 2021, SILVA, 2022a].

Apresenta-se como um gás em temperatura e pressão ambiente e sua combustão, livre de carbono, não gera nenhum poluente, apenas água. A reação de combustão do hidrogênio é representada na equação (1),



Além disso, o hidrogênio é capaz de armazenar e fornecer grandes quantidades de energia por possuir elevada capacidade energética por unidade de massa quando comparado a outros combustíveis fósseis, conforme demonstrado na Tabela 1.

Durante muitos anos, o uso do hidrogênio como combustível esteve limitado a aplicações espaciais, como a propulsão de foguetes, e a demonstrações em veículos automotivos protótipos [BEZERRA, 2021]. Hoje, o hidrogênio é amplamente utilizado em diversas indústrias, destacando-se no refino de petróleo, na produção de amônia e metanol, além de ser empregado em refinarias, siderurgia, indústria alimentícia, semicondutores e geração de energia [OLIVEIRA, 2022]. Além disso, o hidrogênio pode

Tabela 1. Poder calorífico inferior dos combustíveis por unidade de massa (MJ/kg) de diversos combustíveis.

Combustível	Poder Calorífico (MJ/kg)
Hidrogênio	120,0
Gás Natural Liquefeito	54,4
Propano	49,6
Gasolina de Aviação	46,8
Gasolina Automotiva	46,4
Diesel automotivo	45,6
Etanol	29,6
Metanol	19,7

Fonte: Adaptado de [SILVA, 2022a].

ser armazenado e utilizado em sistemas de geração de energia ou motores a combustão, evidenciando sua versatilidade e importância crescente no cenário energético atual [SILVA, 2022a].

Entretanto, aproximadamente 95% do hidrogênio consumido globalmente é produzido a partir de combustíveis fósseis, principalmente metano, carvão e nafta [MARQUES et al., 2017]. O grande desafio atual é encontrar métodos para produzir hidrogênio de maneira limpa, eficiente, econômica e ambientalmente sustentável.

3 Rotas de produção e classificação do Hidrogênio

O hidrogênio não é considerado uma fonte primária de energia, é um vetor energético, ou seja, um portador de energia que por não existir em grandes quantidades de forma livre na natureza, faz-se necessário produzi-lo através de fontes de energia primária.

O H₂ pode ser obtido a partir de combustíveis fósseis, biomassa, de água ou da mistura de biomassa e água (IEA, 2019). As vias de obtenção de hidrogênio podem ser realizadas por meio de diversos processos, dependendo da tecnologia e fonte de energia, associados a diversos tipos de emissões e custos de produção, sendo as fontes não renováveis as mais viáveis economicamente e as menos sustentáveis [BEZERRA, 2021, SILVA, 2022b].

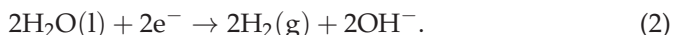
De forma geral, o hidrogênio pode ser obtido por meio de processos termoquímicos, biológicos, eletrolíticos e fotolíticos.

Os processos termoquímicos utilizam calor e catalisadores para promover reações químicas visando à produção de hidrogênio, seja a partir de matérias-

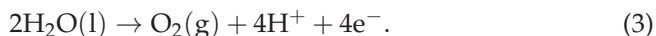
primas fósseis, como o gás natural e a nafta, ou de fontes renováveis, como a biomassa. Essa rota é a mais empregada, principalmente devido aos custos relativamente baixos em comparação com outras rotas. Entre os processos termoquímicos mais comuns para a produção de hidrogênio, destacam-se a reforma a vapor do metano e a gaseificação do carvão mineral. No entanto, é importante ressaltar que apresentam elevadas emissões de CO₂. Os processos biológicos envolvem o uso de organismos vivos, como plantas, algas e bactérias, que podem realizar fotossíntese ou fermentação para produzir hidrogênio de maneira ambientalmente sustentável. No entanto, é importante destacar que esta é uma rota alternativa ainda em desenvolvimento, devido à sua produção relativamente baixa e custos mais elevados [CALGITAN & ABUNDO, 2021].

Os processos eletrolíticos envolvem a utilização de energia elétrica para dividir a molécula de água em hidrogênio e oxigênio através de reações de oxirredução. Essa abordagem é frequentemente considerada o futuro da produção de hidrogênio, especialmente quando utiliza energia renovável, sendo classificada como uma rota verde devido à ausência de emissões de CO₂ no processo. No entanto, é relevante notar que essa técnica requer equipamentos de eletrólise de alto custo e a necessidade de utilizar água de alta pureza, o que a torna ainda relativamente dispendiosa em comparação com os métodos termoquímicos. As semi reações e a reação global da eletrólise da água são representadas nas seguintes equações:

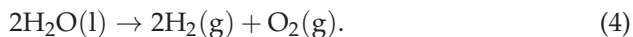
Cátodo (redução):



Ânodo (oxidação):



Reação Global:



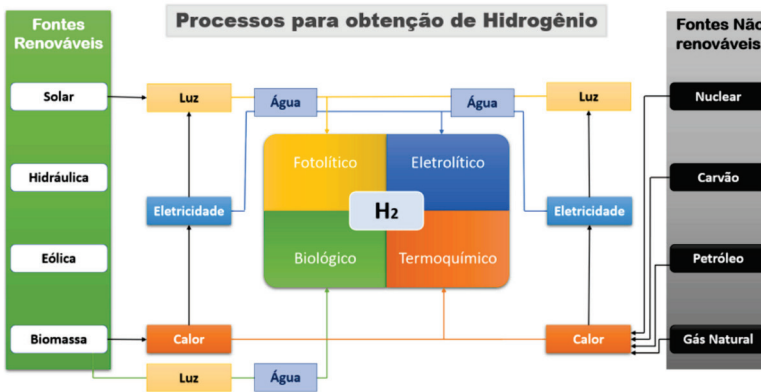
Os processos fotolíticos empregam a energia luminosa e catalisadores para decompor a molécula de água de maneira análoga à eletrólise, porém sem a necessidade de energia elétrica. Nesse processo, um catalisador, geralmente um semicondutor, é eletronicamente excitado por radiação eletromagnética (luz), possibilitando a ocorrência de reações de oxirredução resultando na quebra da molécula de água em hidrogênio e oxigênio. A reação do processo fotolítico da água é representada na equação (5):



A fotocatalise heterogênea é considerada uma rota alternativa na produção de hidrogênio e se destaca por ser uma rota limpa na produção de hidrogênio, pois utiliza apenas luz como fonte energética para a produção de hidrogênio.

Os processos para obtenção de hidrogênio a partir de suas fontes podem ser observados na Figura 1.

Figura 1. Processos para obtenção de hidrogênio.



Fonte: Autores (2024).

De acordo com as diversas rotas de produção o hidrogênio é classificado conforme sua fonte primária, seu processo produtivo e sustentabilidade. Existem diversas classificações em cores para o hidrogênio, na Figura 2 são apresentadas seis classificações do hidrogênio: Preto/marrom, cinza, azul, turquesa, verde e rosa.

Figura 2. Fontes, processos e classificação em cores do hidrogênio.

Cor	Hidrogênio PRETO/MARROM	Hidrogênio CINZA	Hidrogênio AZUL	Hidrogênio TURQUESA	Hidrogênio VERDE	Hidrogênio ROSA
Processo	Gaseificação	SMR ou gaseificação	SMR ou gaseificação com captura de carbono (85-95%)	Pinólise	Eletrolise	Eletrolise
Fonte	Carvão	Metano ou carvão	Metano ou carvão	Metano	Energia renovável	Nuclear

Fonte: Fundação Heinrich Boll (2021).

hidrogênio preto/marrom é obtido por meio da gaseificação do carvão, enquanto o hidrogênio cinza é produzido pela reforma a vapor do metano. Atualmente, esses processos representam as principais rotas de produção de hidrogênio e contribuem significativamente para as emissões de CO₂. De acordo com a IEA (2019), em 2018, aproximadamente 70 milhões de toneladas de H₂ foram produzidas, sendo 76% provenientes do gás natural e quase todo o restante, 23%, proveniente de carvão. Assim, foram liberadas de 12 a 19 toneladas de CO₂ por tonelada de H₂ quando produzido a partir do carvão, hidrogênio preto/marrom, e 10 toneladas de CO₂ por tonelada de H₂ quando produzido a partir de gás natural, hidrogênio cinza [Fund. Heinrich Böll, 2021, OLIVEIRA, 2022].

O hidrogênio azul também é obtido do carvão e do metano com os mesmos processos gaseificação e reforma a vapor, porém utiliza tecnologias de captura, uso, transporte e armazenamento de CO₂. Esse processo, CCSU (*Carbon Capture, Utilisation and Storage*), pode reduzir as emissões em cerca de até 95%. De acordo com a IEA (2019), existem experiências de produção com CCSU com emissões residuais na ordem de 2 toneladas de CO₂ por tonelada de H₂ e apresenta potenciais de reduzir as emissões de CO₂ a 0,4 toneladas de CO₂ por tonelada de H₂ [OLIVEIRA, 2022].

Outra variante de classificação do hidrogênio de baixa emissão é o turquesa, produzido através da pirólise do gás natural que precipita o carbono na sua forma elementar. O hidrogênio verde, por sua vez, é obtido pela eletrólise da água, utilizando energia elétrica proveniente de fontes renováveis, como solar e eólica. Essa abordagem é uma resposta crucial na busca por soluções sustentáveis, pois não apenas fornece uma fonte limpa de hidrogênio, mas também contribui para a transição energética, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e minimizando as emissões de carbono. Já o hidrogênio rosa é obtido através da eletrólise da água com o uso de energia elétrica derivada da energia nuclear. Essa abordagem, embora compartilhe a técnica de eletrólise com o hidrogênio verde, levanta discussões particulares sobre a segurança e os aspectos ambientais associados à energia nuclear, apesar de ser uma rota que não depende de combustíveis fósseis e nem libera CO₂. Os custos e emissões dos tipos de hidrogênio podem ser vistos na Tabela 2.

Outra vantagem do hidrogênio verde é a sua capacidade de aproveitar quantidades excedentes de energia solar e eólica, que não podem ser armazenadas diretamente. Nesse processo, o excedente de energia renovável é direcionado para a realização da eletrólise da água, resultando

Tabela 2. Custo médio de alguns tipos de Hidrogênio e suas respectivas médias de emissões de CO₂.

Tipo de Hidrogênio	Preço médio por kg em Euros (€)	Preço médio por kg em Reais (R\$)	Emissão de CO ₂ (kg CO ₂ / kg H ₂)
Cinza	1,5	9,26	9,3
Azul	2,0	12,34	Baixa
Verde	2,5 - 5,5	15,43 - 33,95	\$0~{**}

Fonte: [ERBACH & JENSEN, 2021]. Nota: * Cotação do Euro para Real (1:6,17) 28/10/2024; ** Para o método de eletrólise.

na produção de hidrogênio que pode ser armazenado para uso posterior [OLIVEIRA, 2022].

O hidrogênio verde é tido como a maior aposta para uma transição energética sustentável visando a redução da emissão de CO₂ [BEZERRA, 2021]. O grande desafio é tornar sua produção mais viável economicamente. Considerando a produção por eletrólise da água, o seu principal custo é o da eletricidade produzida a partir de fontes renováveis, valor esse que pode variar muito em função da região devido a sua disponibilidade [Fund. Heinrich Böll, 2021]. Apesar disso, de acordo com [IRENA, 2022a], os custos associados a fontes de energias renováveis deverão apresentar queda ao longo dos anos, projetando uma redução nos custos de produção do hidrogênio verde. Espera-se uma redução de custos de US\$ 6 para US\$ 2 por kg nos próximos 10 anos.

Além da eletrólise, a fotocatalise heterogênea da água é vista como outra via para a produção do hidrogênio verde. Embora seja um processo relativamente novo, apresenta-se com grande potencial para a produção limpa e sustentável de hidrogênio.

4 Fotocatálise heterogênea para produção de Hidrogênio Verde

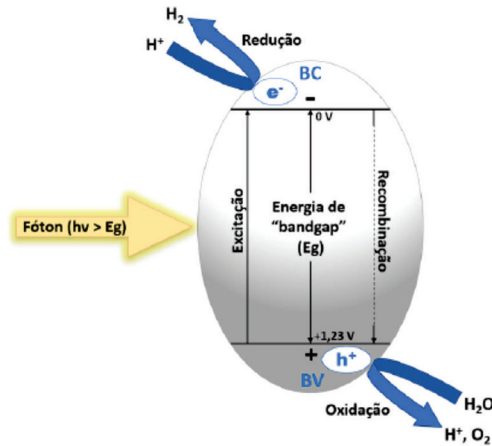
A fotocatalise heterogênea é uma reação química induzida por radiação eletromagnética (luz) na presença de um fotocatalisador sólido, que promove a reação sem ser consumido ou transformado [LIAO et al., 2012].

A reação ocorre na superfície do fotocatalisador que tem suas propriedades catalíticas ativadas pela absorção de fótons de energia apropriada, igual ou superior à energia de excitação do material (*band gap*), induzindo a excitação de elétrons da banda de valência (BV) à banda de condução

(BC) e estabelecendo o par elétron/lacuna (h_{BV}^+/e_{BC}^-), responsáveis por gerar equivalentes redox que são capazes de promover transformações químicas de espécies adsorvidas na superfície do fotocatalisador [ROCHA et al., 2020, ALVES, 2022].

Tratando-se da fotocatalise heterogênea da água, as lacunas geradas na banda de valência permitem a oxidação da água produzindo O_2 , ao passo que os elétrons da banda de condução reduzem o H^+ em gás Hidrogênio (H_2) [LOPES, 2021, SILVA, 2022a] (Figura 3).

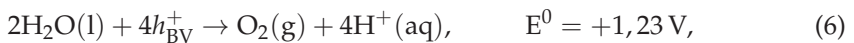
Figura 3. Esquema representativo do mecanismo fotocatalítico da água para produção de H_2 .



Fonte: Adaptado de [LOPES, 2021, SILVA, 2022a].

A fotocatalise heterogênea ocorre em três etapas: (I) absorção de fótons com energia superior ao *band gap* do semicondutor, produzindo lacunas (h^+) e elétrons (e^-); (II) separação das cargas e migração de portadores de cargas fotogerados para os sítios ativos da superfície; e (III) reações químicas na superfície do semicondutor para evolução de H_2 na banda de condução (BC) e evolução de O_2 na banda de valência (BV) [KUDO & MISEKI, 2009].

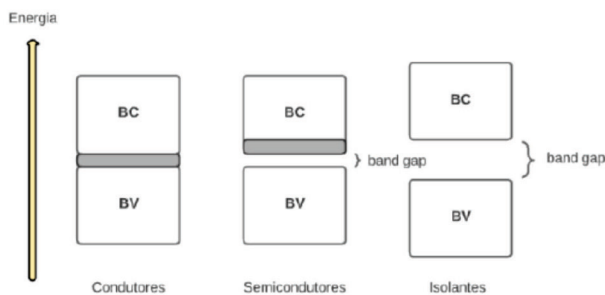
As equações (6), (7), e (8) demonstram as reações de oxidação da água, redução do H^+ e a reação global, respectivamente,



O processo de separação da água é endergônico, o que indica que é uma reação não espontânea. Termodinamicamente, isso implica em um elevado gasto energético para se processar. Para que essa reação ocorra somente sob irradiação luminosa, é fundamental que o fotocatalisador seja um semicondutor apropriado para a reação [ALVES, 2022].

Semicondutores são materiais que possuem condutividade elétrica intermediária podendo atuar tanto como condutores quanto como isolantes. Esses materiais são sólidos constituídos por uma rede tridimensional infinita e possuem sobreposição dos orbitais atômicos que abrangem toda a rede, gerando uma configuração que permite a formação das bandas de valência (BV) e de condução (BC) separadas por uma diferença finita de energia, chamada energia de *band gap* (Eg). Essas características tornam os semicondutores ideais para a fotocatalise heterogênea [MACHADO, 2020, ALMEIDA, 2021].

Figura 4. Representação esquemática de diagramas de bandas para materiais condutores, semicondutores e isolantes.



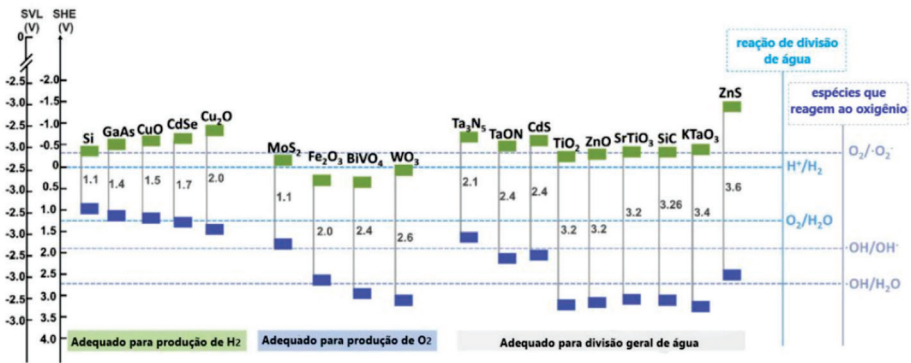
Fonte: Adaptado de [ALMEIDA, 2021].

O fotocatalisador deve ser escolhido conforme a sua finalidade. Os valores de potenciais redox da banda de condução e banda de valência devem ser adequados à reação desejada. Em regra, o potencial da banda de condução deve ser mais negativo que o potencial de redução da substância; e, o potencial da banda de valência deve ser mais positivo que o potencial de oxidação da substância. Para a decomposição fotocatalítica da água é necessário que o fotocatalisador tenha *band gap* de 1,23 eV a 3,26 eV, além disso, a banda de condução (BC) deve ser mais negativa que o potencial redox de H^+ / H_2 (0,00 V vs ENH), e a banda de valência (BV) deve ser mais positiva

que o potencial redox de O_2/H_2O (1,23 V vs ENH) [HUANG et al., 2020, LOPES, 2021].

Dentre os diversos semicondutores citados na literatura, os mais utilizados no processo de fotocatalise para produção de hidrogênio são TiO_2 , ZnO , Nb_2O_5 , WO_3 , $SrTiO_3$. A Figura 5 mostra os principais catalisadores e seus respectivos potenciais [SILVA, 2022b].

Figura 5. Relação entre a estrutura da banda de semicondutores e os potenciais redox de divisão de água.



Fonte: Adaptado de [HUANG et al., 2020].

O TiO_2 foi o primeiro semicondutor retratado como catalisador na divisão fotoquímica da água, e até hoje, é o material mais empregado nesse processo devido à sua excelente atividade fotocatalítica, elevada estabilidade, insolubilidade em água e sua ampla fotoestabilidade. Além disso, é bastante abundante, o que contribui para o seu baixo custo de obtenção. No entanto, apresenta limitações, como a elevada taxa de recombinação dos pares elétrons e lacunas, restringindo a atividade fotocatalítica. Além disso, sua faixa de absorção de radiação eletromagnética se localiza, em sua grande parte, na região do ultravioleta, o que reduz o seu rendimento na região da luz visível [BACCARO et al., 2019, LOPES, 2021].

Para contornar as limitações dos catalisadores e otimizar o desempenho da fotocatalise heterogênea, são adotados métodos como a dopagem do semicondutor com metais ou óxidos metálicos. Essa estratégia altera a superfície do material, não só reduzindo a recombinação dos pares, elétrons e lacunas, mas também modificando a faixa de absorção do fotocatalisador, tornando-o ativo na região da luz visível. Adicionalmente, substratos

orgânicos podem ser usados como reagentes de sacrifício para serem oxidados pelas lacunas minimizando a recombinação [LIAO et al., 2012, HUANG et al., 2020, MANCUSO et al., 2021, SILVA, 2022a].

A fotocatalise heterogênea apresenta-se como uma excelente alternativa para produção de hidrogênio sustentável. Esta revisão sistemática de literatura apresenta estudos para auxiliar na compreensão da viabilidade da produção de hidrogênio sustentável por fotocatalise heterogênea, classificar os desafios e avaliar a aplicação industrial deste processo.

5 Considerações Finais

O hidrogênio verde se posiciona como uma das soluções mais promissoras para enfrentar os desafios energéticos e ambientais globais. Sua capacidade de fornecer energia de maneira limpa e renovável, sem gerar emissões de carbono, o torna um elemento central na transição para uma economia mais sustentável e menos dependente de combustíveis fósseis.

Apesar de enfrentar obstáculos significativos, como os altos custos de produção e a necessidade de infraestrutura avançada, os avanços tecnológicos e o crescente interesse em soluções sustentáveis indicam que o hidrogênio verde tem potencial para se tornar uma peça fundamental no mix energético global. A expansão do uso de energias renováveis, como solar e eólica, reduz os custos de eletricidade necessária para a produção de hidrogênio por eletrolise, tornando o hidrogênio verde cada vez mais viável e acessível.

Investir em pesquisa e desenvolvimento é crucial para acelerar a inovação nesse setor. A criação de políticas públicas que incentivem a adoção de tecnologias limpas e que proporcionem um ambiente regulatório favorável é essencial para garantir que o hidrogênio verde possa atingir seu potencial máximo. Além disso, o estabelecimento de infraestrutura robusta para produção, armazenamento e distribuição é necessário para suportar a expansão desse combustível.

Em suma, o hidrogênio verde possui o potencial de transformar a matriz energética mundial e promover um futuro onde o crescimento econômico e a preservação ambiental andem lado a lado. Com compromisso e colaboração global, é possível imaginar um cenário em que o hidrogênio verde desempenhe um papel de destaque, consolidando-se como um dos pilares da energia sustentável no século XXI.

Referências Bibliográficas

- [ALMEIDA, 2021] ALMEIDA, A. *Síntese e caracterização de catalisadores à base de titanato de bismuto via rota OPM com potencial para aplicação em fotocatalise e produção de hidrogênio*. 2021. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/235812>.
- [ALVES, 2022] ALVES, H. *Preparação de nanocompósitos de hexaniobato com nanopartículas de Au com alta estabilidade e eficiência fotocatalítica para produção de hidrogênio*. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Uberlândia, 2022. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.404>.
- [BACCARO et al., 2019] BACCARO, A., et al. TiO₂-mediated photocatalysis at the nanoparticulate state: Review of the reactivity by the trapping concept and some applications in analytical chemistry. *Química Nova São Paulo*, v. 42, n. 3, pp. 329–345, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170332>.
- [BEZERRA, 2021] BEZERRA, F. *Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia*. 2021. Banco do Nordeste do Brasil (Caderno Setorial ETENE). Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/1109>.
- [ERBACH & JENSEN, 2021] ERBACH, G.; JENSEN, L. *EU Hydrogen Policy. Hydrogen as an energy carrier for a climate-neutral economy*. 2021. Disponível em: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689332/EPRS_BRI\(2021\)689332_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689332/EPRS_BRI(2021)689332_EN.pdf).
- [EPE, 2023] Empresa de Pesquisa Energética (EPE). *Matriz Energética e Elétrica*. 2023. Disponível em: www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica.
- [CALGITAN & ABUNDO, 2021] CALGITAN, D.; ABUNDO, M. A review of biohydrogen production technology for application towards hydrogen fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 151, p. 111413, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111413>.
- [Fund. Heinrich Böll, 2021] Fundação Heinrich Böll. *Desafios e oportunidades para o Brasil com o hidrogênio verde*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2021. Disponível em: <https://br.boell.org/pt-br>.

- [HUANG et al., 2020] HUANG, C., et al. A current perspective for photocatalysis towards the hydrogen production from biomass-derived organic substances and water. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 36, pp. 18144–18159, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.121>.
- [IEA, 2023] International Energy Agency (IEA). *Energy Technology Perspectives 2023*. 2023. Disponível em: www.iea.org.
- [IEA, 2022a] International Energy Agency (IEA). *Energy Efficiency 2022*. 2022. Disponível em: www.iea.org.
- [IEA, 2022b] International Energy Agency (IEA). *Renewables 2022*. 2022. Disponível em: www.iea.org.
- [IEA, 2021] International Energy Agency (IEA). *The Future of Hydrogen*. 2021. Disponível em: www.iea.org.
- [IPCC, 2021] IPCC. *The physical science basis*. 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- [IRENA, 2022a] International Renewable Energy Agency (IRENA). *Green hydrogen: A guide to policy making*. 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/>.
- [IRENA, 2022b] International Renewable Energy Agency (IRENA). *Reaching zero with renewables: Eliminating CO₂ emissions from industry and transport in line with the 1.5 °C climate goal*. 2022. Disponível em: www.irena.org/publications/.
- [IRENA, 2022c] International Renewable Energy Agency (IRENA). *World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5 °C Pathway*. 2022. Disponível em: www.irena.org/publications/.
- [KUDO & MISEKI, 2009] KUDO, A.; MISEKI, Y. Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting. *Chem. Soc. Rev.*, v. 38, n. 1, pp. 253–278, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/B800489G>.
- [LIAO et al., 2012] LIAO, C.; HUANG, C.; WU, J. Hydrogen production from semiconductor-based photocatalysis via water splitting. *Catalysts*, 2012. Disponível em: <http://doi.org/10.3390/catal2040490>.

- [LOPES, 2021] LOPES, J. *Produção fotocatalítica de hidrogênio utilizando diferentes catalisadores à base de titânio*. Dissertação (Engenharia Ambiental e Sanitária) – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, 2021. Disponível em: <http://ppger.ifce.edu.br/wp-content/uploads/2021/04/LOPESJ.Q.pdf>.
- [MACHADO, 2020] MACHADO, W. *Produção de hidrogênio por via fotocatalítica empregando novos compósitos à base de SiO₂ revestidos com TiO₂*. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Uberlândia, 2020. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.564>.
- [MANCUSO et al., 2021] MANCUSO, A., et al. Visible light active fe-pr co-doped tio2 for water pollutants degradation. *Catalysis Today*, v. 380, pp. 93–104, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.04.018>.
- [MARQUES et al., 2017] MARQUES, F.; STUMBO, A.; CANELA, M. Estratégias e materiais utilizados em fotocatalise heterogênea para geração de hidrogênio através da fotólise da água. *Química Nova*, v. 40, n. 5, pp. 561–571, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170015>.
- [OLIVEIRA, 2022] OLIVEIRA, R. Panorama do hidrogênio no Brasil. *Brasília* [s.n.], 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.38116/td2787>.
- [ROCHA et al., 2020] ROCHA, A., et al. Modificação superficial em óxidos de nióbio para a produção de hidrogênio. *Revista Tecnologia e Tendências*, v. 11, n. 1, pp. 112, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.25112/rtt.v11i1.2229>.
- [SILVA, 2022a] SILVA, A. *Reatores fotocatalíticos de múltiplas reações simultâneas: estudo das variáveis operacionais na produção de hidrogênio (H₂)*. Monografia (Engenharia Ambiental e Sanitária) – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, 2022. Disponível em: biblioteca.ifce.edu.br/index.asp?codigo_sophia=104893.
- [SILVA, 2022b] SILVA, D. *Os principais desafios do uso do hidrogênio no contexto brasileiro para a descarbonização: uma breve revisão bibliográfica*. Trabalho de conclusão de curso (M.B.E.) – Instituto de Energia da PUC-Rio, 2022. Disponível em: http://iepuc.puc-rio.br/dados/files/2019/TCC-MBE-Energia-Debora_Cristina_Ferreira_da_Silva.pdf.

Poluição de corpos hídricos por fármacos: lignina kraft como alternativa sustentável na adsorção de contaminantes

Lázaro Henrique Pereira¹ e Francisco Avelino²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE,
Campus de Maracanaú, Brasil

²Departamento de Química Orgânica e Inorgânica,
Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, Brasil, Brasil

1 Introdução

A crescente industrialização somado ao desenvolvimento da sociedade acarretaram diversos benefícios para a população humana, porém atrelado ao desenvolvimento também ocorreram diversos impactos negativos ao meio ambiente, principalmente aos recursos hídricos, visto que a água é um recurso de suma importância para a sobrevivência dos seres vivos. Por conta disso, um dos aspectos ambientais mais preocupantes é o lançamento irregular de efluentes contendo substâncias tóxicas potencialmente perigosas aos ecossistemas, que podem comprometer à saúde humana, como metais pesados, fármacos e pesticidas de difícil remoção nos tratamentos convencionais [BELTRAN et al., 2020, PRESSI, 2021]. A escassez de recursos não renováveis, agregados à preocupação com o meio ambiente, tem despertado a necessidade da criação de novas tecnologias para substituição dos polímeros derivados de petróleo e aumento do uso de recursos renováveis [MARQUES NETO, 2016].

O Eucalipto é considerado uma das espécies arbóreas mais utilizadas para a produção de papel e celulose, principalmente na América do Sul. Esse fator se dá principalmente pela alta qualidade da madeira, pois apresenta um bom desempenho para a produção de celulose com alto rendimento industrial, baixo custo e alta qualidade [JARDIM et al., 2017]. O Brasil se destaca no setor de papel e celulose, sendo considerado o quarto maior produtor de celulose e nono maior produtor de papel no mundo, contando com diversas empresas e empregos gerados através dessa atividade e o eucalipto é a espécie com maior área plantada no País [TOLEDO et al., 2015].

A extração da celulose nos processos industriais, consiste basicamente na transformação da madeira em um material fibroso, conhecido como polpa ou pasta celulósica, através desse processo ocorre a fragmentação da lignina, agente ligante entre as fibras da madeira, onde os carboidratos são dissolvidos e convertidos em ácidos de baixa massa molecular. O método químico Kraft é um dos meios de extração mais utilizados pela indústria pela alta eficiência na produção de uma polpa forte e resistente [MARCELINO, 2019]. Este processo utilizado na fabricação do papel deve ocorrer precisamente em meio alcalino, onde os cavacos da madeira são aquecidos a altas temperaturas, variando de 150 a 170 °C e sob pressão, com uma solução contendo hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S), ocorrendo nessa etapa a separação das fibras de celulose com a Lignina [MIRANDA, 2000].

O licor negro do processo Kraft, por exemplo, é constituído de carboidratos, ou seja, rico em material orgânico, que através da queima, contribui na redução do efluente industrial e também como fonte de matriz energética. Porém, outra utilização de maior valor agregado, além da queima do licor negro, é a conversão da biomassa em combustível, energia e outros produtos químicos, auxiliando também na redução da carga de sólidos no licor negro, anterior a etapa de recuperação dos materiais inorgânicos [DEMUNER, 2021]. A lignina apresenta alto potencial na utilização em aditivo de concreto, na indústria cerâmica e na utilização como resina fenólica. Aliado a isso, diversos estudos têm mencionado o uso da lignina advinda do licor negro como adsorventes de corantes orgânicos e de metais pesados, através de processos físico-químicos em que moléculas presentes em um fluido são acumuladas na superfície de um material sólido de forma espontânea [OLIVEIRA et al., 2017].

Com o avanço das indústrias farmacêuticas e a descoberta de novos medicamentos, ocorreu também um considerável aumento no uso de fármacos, principalmente dos antibióticos, utilizados no tratamento de

doenças, porém, por conta do uso exagerado de diversos medicamentos, microrganismos patógenos podem desenvolver uma certa resistência devido ao contato primário no meio ambiente, dificultando assim o tratamento de diversas doenças e exigindo diversas modificações para os fármacos, ocasionando a potencialização dos medicamentos. Somado a isso, ao consumir o medicamento, parte dele é utilizado pelo corpo, enquanto outra parte é eliminada junto com os dejetos, fazendo com que pequenas concentrações dos medicamentos estejam presentes em águas residuais e consequentemente nos corpos hídricos [OLIVEIRA et al., 2017].

Os fármacos, assim como outros contaminantes, não são biodegradáveis e podem ser encontrados facilmente em águas residuárias, pois eles são resistentes aos tratamentos biológicos e não são eliminados nos tratamentos convencionais. Por esse fator, inúmeras pesquisas têm sido realizadas para a descoberta de materiais adsorventes. Nesse caso, a lignina extraída do Eucalipto apresenta estrutura fenólica com alto potencial adsorativo [VIOTTI et al., 2017]. Com isso, o objetivo deste capítulo é discutir sobre a problemática referente à presença de fármacos em corpos hídricos e a utilização da lignina Kraft como bioadsorvente para remoção desses contaminantes em efluentes.

2 Presença dos Fármacos Em Corpos Hídricos

Diversos produtos farmacêuticos, como anti-inflamatórios, antibióticos e analgésicos são essenciais à saúde humana, sendo responsáveis pela prevenção de doenças infecciosas e melhorando significativamente a qualidade de vida. Sem a medicação adequada, haveria uma grande taxa de mortalidade, revelando o alto benefício dos produtos farmacêuticos. Por outro lado, o consumo de medicamentos tem aumentado em virtude de diversos fatores, como o crescimento populacional, densidade da população, aumento da longevidade, progresso contínuo da medicina e altos investimentos na saúde, porém a maior preocupação surge quando um número considerável de substâncias é encontrado em corpos hídricos naturais, pois cerca de 2.000 compostos farmacêuticos ativos são administrados globalmente em medicamentos, passando a ser considerados micropoluentes, encontrados na faixa de nano a micro gramas por L (ng/L a µg/L) em águas subterrâneas, superficiais e até em água potável [KUTUZOVA et al., 2021].

Os antibióticos, são considerados os fármacos que podem causar os piores efeitos adversos ao corpo que entrar em contato com seus resíduos, visto que

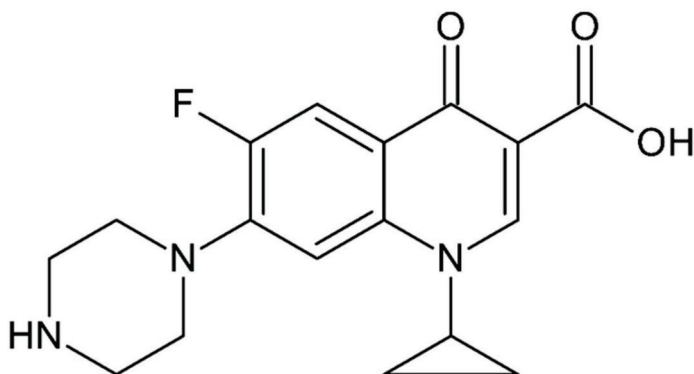
alguns grupos desses medicamentos visam organismos específicos, destroem ecossistemas e não são biodegradáveis, podendo permanecer por um longo tempo no meio ambiente [MALAKOOTIAN et al., 2021]. A partir da década de 1970, a presença de fármacos em corpos hídricos começou a apresentar maior evidência entre diversos pesquisadores, porém os estudos sobre a presença desses compostos no meio ambiente só foram intensificados por volta dos anos 1990, principalmente pelo alto consumo de medicamentos e vários compostos detectados nas faixas de concentração de μgL^{-1} a ng^{-1} , em estações de tratamento de esgoto de diversos países como França, Grécia, Suíça e em águas subterrâneas da Alemanha e águas superficiais nos Estados Unidos [SILVA et al., 2022].

Alguns estudos realizados demonstraram que a presença de fármacos não está recluso apenas em efluentes ou corpos hídricos, mas até mesmo em efluentes tratados e água potável, evidenciando que os processos de tratamento convencionais não apresentam eficiência garantida para o tratamento de efluentes contendo poluentes emergentes, principalmente os advindos da indústria farmacêutica. Ademais, os antimicrobianos estão incluídos entre os principais fármacos com impactos adversos ao meio ambiente, visto sua capacidade de atuar sobre organismos aquáticos da mesma forma que podem atuar nos patógenos presentes no corpo humano, como as cianobactérias, um grupo de microrganismos fotossintéticos e unicelulares, encontrados em lagos, rios e oceanos, que apresentam a capacidade de troca de genes de resistência entre outras bactérias e cianobactérias, além da resistência aos antimicrobianos variar entre espécies de cianobactérias e até mesmo entre cepas da mesma espécie. Dentre os antimicrobianos mais utilizados, a ciprofloxacina ganha destaque, pois é o antibiótico mais detectado em efluentes de várias partes do mundo, devido ao seu uso intenso em hospitais e pela população humana [AZEVEDO et al., 2019].

A ciprofloxacina (Figura 1) é um dos antibióticos mais importantes na medicina, sendo utilizado para o tratamento de doenças provocadas pelos grupos de bactérias Gram-positivas e/ou Gram-negativas. Porém, assim como outros antibióticos, esse medicamento pode se acumular no corpo dos organismos, apresentando um alto risco à saúde, tanto pelo seu potencial ecotóxico, como pela sua resistência à degradação, estabilidade e alta concentração presente em águas residuais. Alguns estudos realizados, detectaram concentrações de 0,001 mg/L em efluentes e águas superficiais, enquanto que em águas residuais de hospitais e em efluentes farmacêuticos, foi detectado concentrações de 0,15 mg/L e 0,30 mg/L, respectivamente.

Apesar de pequenos valores encontrados em meio aquoso, vale salientar que o acúmulo contínuo desse composto pode apresentar grande risco para os ecossistemas aquáticos, assim como diversos desequilíbrios genéticos e biológicos para a biota afetada [MALAKOOTIAN et al., 2021].

Figura 1. Estrutura química da ciprofloxacina.



Fonte: Autores (2024).

Segundo [TOFANELLO et al., 2021, p. 1]:

A ciprofloxacina (CIP) é um antibiótico fluoroquinolona de terceira geração que é amplamente utilizado para tratar uma ampla variedade de infecções bacterianas. A estrutura química do CIP apresenta dois grupos funcionais ionizáveis, o grupo 6-carboxílico com $pK_{a1} = 6,09$ e o N-4 do anel piperazina com $pK_{a2} = 8,62$, resultando em um ponto isoelétrico (pI) de 7,14. A ocorrência do cruzamento intersistemas do estado singlete eletronicamente excitado de quinolonas após a absorção da luz é relatada na literatura (...). A fotoexcitação do CIP produz estados excitados trigêmeos que podem desencadear reações que levam à fotossensibilidade em pacientes submetidos a tratamento com antibióticos. Por outro lado, as propriedades fotofísicas do CIP também estão envolvidas na sua fotodegradação em diversos ambientes expostos à luz. O uso generalizado de CIP promoveu a poluição em ambientes aquáticos.

A prescrição média anual da CIP é de 33.000 kg, resultando em uma ampla distribuição em diversas matrizes ambientais, ocasionando sua presença principalmente em matrizes aquáticas. Em águas superficiais, por

exemplo, foram detectadas concentrações entre 1,5 e 7,1 ng/L⁻¹, enquanto em efluentes hospitalares as concentrações detectadas são bem superiores, chegando a 8,95 ng/L⁻¹. Apesar da pequena quantidade encontrada em corpos hídricos, variando de nanograma a micrograma (ng a µg), a presença desse poluente no meio ambiente apresenta diversos riscos ao meio ambiente e ao ser humano devido ao seu potencial acumulativo. Uma das principais preocupações está relacionada a distúrbios endócrinos à fauna e à flora, como estresse oxidativo, danos celulares e inibição de fotossíntese de algumas plantas, aumento da toxicidade no meio ambiente e principalmente a perpetuação de patógenos multirresistentes. Por esse fator, algumas metodologias têm sido desenvolvidas para remoção ou degradação desse grupo de contaminantes em corpos hídricos [CORDEIRO et al., 2022].

2.1 A Lignina Kraft e o Processo de Adsorção

No contexto dos Objetivos do desenvolvimento sustentável das Nações Unidas, se destaca a garantia de água limpa e saneamento, que apresenta como um dos principais objetivos: “até 2030, melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas (...)” [ONU, 2015, p. 18]. Assim sendo, há a necessidade de desenvolver métodos eficientes para a redução de contaminantes dos corpos hídricos, já que métodos convencionais, como processos de oxidação avançada, biofiltração, cloração e outros, não possuem alta seletividade para purificação de águas residuais, além de apresentar incertezas e condições operacionais sensíveis. Novos métodos têm surgido com a finalidade de remoção de poluentes em água para abastecimento público e efluentes, dentre os quais, o método de adsorção ganha destaque por apresentar alta eficiência e fácil operação. Porém, tem-se a necessidade do desenvolvimento de adsorventes inovadores, eficientes, ecológicos e de baixo custo, visando o avanço sustentável [SUN et al., 2021].

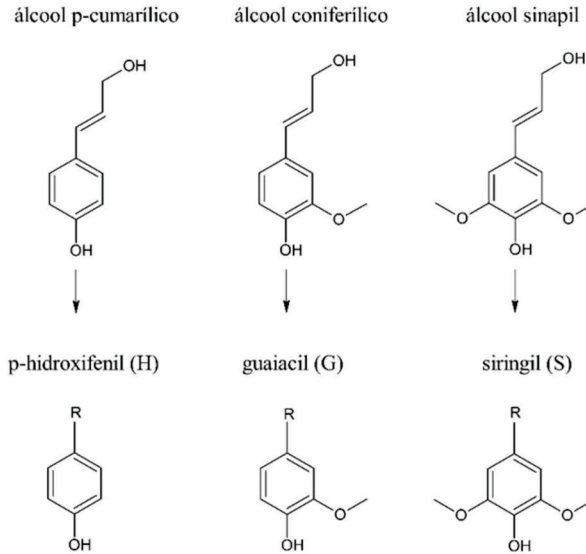
A utilização de adsorventes ecológicos no processo de adsorção de contaminantes pode fornecer uma grande fonte de matéria-prima. Somado a isso, a produção de biossorventes agrega valor à resíduos que não são bem aproveitados, como podas de árvores e resíduos florestais em geral. Algumas técnicas de remoção de poluentes, como processos de oxidação avançada, processos físico-químicos e processos biológicos podem apresentar alto risco ambiental, visto que podem ocorrer transformações dos compostos alvo em subprodutos metabólicos, que podem ser tão perigosos como suas próprias

moléculas predecessoras. Outra problemática está relacionada à utilização do carvão ativado comercial, que apesar de apresentar bons desempenhos nos tratamentos de efluentes, também está associado a altos custos no processo produtivo, o que dificulta a aplicação em estação de tratamento de grande porte. Dentre os adsorventes conhecidos, a lignina, apresenta porcentagens de remoção de contaminantes semelhantes ao carvão ativado comercial, podendo ser considerada um viés ambiental de grande valia para o desenvolvimento sustentável [ALVES et al., 2022].

Os resíduos de biomassa que apresentam baixo custo são abundantes na natureza, isso os torna muito interessantes, pois estão disponíveis em grande quantidade, são baratos e podem apresentar um bom potencial como materiais adsorventes, por conta da sua estrutura e das suas características físico-químicas. Os resíduos agrícolas, por exemplo, são constituídos principalmente de três componentes: celulose, hemicelulose e lignina, onde a quantidade de cada componente disponível depende do tipo de vegetal que originou o resíduo. A lignina em especial é um composto polimérico aromático tridimensional formado pela polimerização aleatória do álcool p-cumarílico, álcool coniferílico e álcool sinapílico (Figura 2) [SOUZA et al., 2022]. Com a crescente poluição ambiental, o dilema energético é intensificado, sendo assim, abre espaço para a busca da substituição dos combustíveis fósseis e para produção de produtos químicos com alto valor agregado. Nesse contexto, a valorização da lignina ganha destaque, já que a mesma é um dos recursos de biomassa de maior eficiência, sendo considerada uma fonte de carbono renovável na Terra [CHEN et al., 2022].

Como citado anteriormente, algumas metodologias para tratamento de efluentes têm ganhado destaque atualmente. A utilização de carbono poroso, aerogel e materiais compósitos, apesar da eficiência, apresentam elevados custos de produção, dificultando o seu uso generalizado. A lignina pode ser obtida através do processo de polpação dos cavacos de madeira, processo esse que ocorre nas indústrias de papel e celulose e gera um subproduto, conhecido como licor negro. O licor negro descartado pelas fábricas de papel contém cerca de 60 a 65% de lignina e outros compostos inorgânicos. A descarga incorreta do licor negro chega a representar mais de 10% da poluição de corpos hídricos por efluentes industriais. E apesar do licor negro desidratado ser utilizado como biocombustível para geração de energia, a maior parte da lignina não é utilizada, resultando no desperdício dessa biomassa [LIAO et al., 2022].

Figura 2. Os três precursores monoméricos principais que dão origem a oligômeros/ polímeros de lignina e suas unidades estruturais guaiacil (G) e siringil (S) p-hidroxifenil (H).



Fonte: Autores (2024).

No processo conhecido como extração Kraft, ocorre a deslignificação da madeira, onde os cavacos de madeira são aquecidos sob alta pressão com uma solução contendo hidróxido de sódio e sulfeto de sódio, com o pH entre 13-14 e temperatura de 170 °C. A lignina originada nesse processo é conhecida como lignina Kraft (LK), que pode ser advinda da madeira macia, produzida a partir de espécies gimnospermas, como o pinheiro e abetos, ou da madeira dura, produzida a partir de angiospermas como eucalipto e bétula. A lignina tem sido alvo de estudos devido a preocupações ambientais com o uso dos recursos não renováveis, como o petróleo. Alguns estudos desenvolvidos têm utilizado a lignina Kraft como excelente alternativa renovável para materiais poluentes na área da saúde, desde antibacterianos, administração de medicamentos e filtros UV, até a utilização como compósito híbrido, biocatalisadores e revestimentos anticorrosivos. Essas descobertas têm garantido um alto valor agregado ao uso da lignina e o surgimento de potenciais usos dessa biomassa no mercado [MANISEKARAN et al., 2022].

A indústria de papel e celulose é responsável pela produção média mundial de aproximadamente 55 a 90 milhões de toneladas de lignina por ano, sendo a polpação Kraft a tecnologia mais utilizada para fornecer esse subproduto. A biomassa lignocelulósica, por apresentar elevada abundância, é considerada uma fonte renovável aos combustíveis fósseis, tanto para produção de materiais como para geração de energia. Diversas fábricas utilizam a lignina residual para atender às necessidades energéticas das indústrias de celulose, em contraponto, mais de 60% da lignina produzida é desperdiçada pois ultrapassa a quantidade necessária para geração de energia nas plantas industriais, onde esse recurso de alto valor é pouco explorado, sendo utilizado apenas para a queima [GARCÍA-FUENTEVILLA et al., 2022]. Nesse contexto, o potencial adsorptivo da lignina apresenta diversas vantagens, como alta disponibilidade de recursos, modificação flexível e baixo custo, despertando assim a necessidade de explorar esse recurso e seus mecanismos de adsorção [SHAO et al., 2022].

3 Considerações Finais

A lignina Kraft, um subproduto abundante da indústria de papel e celulose, possui um alto potencial químico que é frequentemente subutilizado. Tradicionalmente, a lignina tem sido utilizada como fonte de energia por meio da queima, ou então descartada, o que contribui para a poluição dos recursos hídricos. Entretanto, a crescente demanda por soluções ambientais sustentáveis e o aumento da consciência ecológica impulsionam o desenvolvimento de tecnologias que valorizam a lignina, promovendo seu uso em aplicações de maior valor agregado.

A aplicação da lignina na adsorção de contaminantes é uma alternativa promissora para aproveitar suas propriedades químicas únicas. Essa biomassa pode ser utilizada para remover corantes, metais pesados e, principalmente, fármacos de efluentes hospitalares e domésticos. A lignina oferece uma solução acessível e ecológica, que ajuda na mitigação de poluentes em corpos hídricos e contribui para a proteção dos ecossistemas aquáticos.

A exploração de novos usos para a lignina, como na indústria cerâmica, aditivos de concreto e tratamento de efluentes, representa não apenas um avanço tecnológico, mas também um compromisso com um futuro mais sustentável. Além de contribuir para a economia circular, o uso da lignina na purificação de águas representa uma abordagem inovadora e viável para

a destinação responsável desse recurso renovável. A valorização da lignina Kraft, portanto, vai ao encontro de metas ambientais globais, tornando-se um exemplo de como resíduos industriais podem ser transformados em soluções ambientais, promovendo a sustentabilidade e a conservação dos recursos naturais.

Referências Bibliográficas

- [ALVES et al., 2022] ALVES, T.; ROZZA, G.; PINHEIRO, A. Evaluation of concerning emergent compounds characteristics and simultaneous biosorption through multivariate technique. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 27, pp. 403–412, 2022.
- [AZEVEDO et al., 2019] AZEVEDO, F., et al. Toxicological effects of ciprofloxacin and chlorhexidine on growth and chlorophyll a synthesis of freshwater cyanobacteria. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 55, 2019.
- [BELTRAN et al., 2020] BELTRAN, L., et al. Processo de biossorção de corante utilizando casca de tangerina (*citrus reticulata*). *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 6, pp. 41760–41771, 2020.
- [BRONZATO et al., 2023] BRONZATO, J., et al. Degradation of ciprofloxacin by green cobalt oxide quantum dots. *Applied Surface Science*, v. 609, p. 155193, 2023.
- [CHEN et al., 2022] CHEN, M., et al. Catalytic depolymerization of kraft lignin to liquid fuels and guaiacol over phosphorus modified mo/sepiolite catalyst. *Chemical Engineering Journal*, v. 427, p. 131761, 2022.
- [CORDEIRO et al., 2022] CORDEIRO, S., et al. Adsorption of emerging pollutant by pecan shell-based biosorbent. *Applied Sciences*, v. 12, n. 18, p. 9211, 2022.
- [DEMUNER, 2021] DEMUNER, I. *Modificações na lignina kraft de eucalipto e produção de lignosulfonatos*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, 2021.
- [GARCÍA-FUENTEVILLA et al., 2022] GARCÍA-FUENTEVILLA, L., et al. Different kraft lignin sources for electrospon nanostructures production:

- Influence of chemical structure and composition. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 214, pp. 554–567, 2022.
- [JARDIM et al., 2017] JARDIM, J., et al. Avaliação da qualidade e desempenho de clones de eucalipto na produção de celulose. *O papel*, v. 78, n. 11, pp. 122–129, 2017.
- [KUTUZOVA et al., 2021] KUTUZOVA, A.; DONTSOVA, T.; KWAPINSKI, W. Application of tio₂-based photocatalysts to antibiotics degradation: Cases of sulfamethoxazole, trimethoprim and ciprofloxacin. *Catalysts*, v. 11, n. 6, p. 728, 2021.
- [LIAO et al., 2022] LIAO, Z., et al. Micromorphology control of the lignin-based activated carbon and the study on the pyrolysis and adsorption kinetics. *Industrial Crops and Products*, v. 175, p. 114266, 2022.
- [MALAKOOTIAN et al., 2021] MALAKOOTIAN, M., et al. Ciprofloxacin removal from aqueous media by adsorption process: A systematic review and meta-analysis. *Desalin. Water Treat.*, v. 229, pp. 252–282, 2021.
- [MANISEKARAN et al., 2022] MANISEKARAN, A., et al. Solvents drive self-assembly mechanisms and inherent properties of kraft lignin nanoparticles ($\leq 50\text{ nm}$). *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 626, pp. 178–192, 2022.
- [MARCELINO, 2019] MARCELINO, T. *Modelagem e simulação da etapa de caustificação do processo kraft de extração de celulose*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2019.
- [MARQUES NETO, 2016] MARQUES NETO, F. *Características da lignina e da polpa celulósica de resíduos fibrosos de dendê pre-tratadas por explosão a vapor*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Brasil, 2016.
- [MIRANDA, 2000] MIRANDA, R. Impactos ambientais decorrentes dos resíduos gerados na produção de papel e celulose. *Seropédica*, Brasil: [s.n.], 2008.
- [OLIVEIRA et al., 2017] OLIVEIRA, C., et al. Extração da lignina presente no licor negro para adsorção de íons de metais pesados. *Percurso Acadêmico*, v. 7, n. 14, pp. 468–482, 2017.

- [PRESSI, 2021] PRESSI, L. *Análise do potencial uso de resíduos agroindustriais como adsorventes alternativos para metais no Rio Grande do Sul*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2021.
- [SHAO et al., 2022] SHAO, L., et al. Facile preparation of oxygen-rich porous polymer microspheres from lignin-derived phenols for selective CO₂ adsorption and iodine vapor capture. *Chemosphere*, v. 288, p. 132499, 2022.
- [SILVA et al., 2022] SILVA, V.; WOLFF, D.; CARISSIMI, E. Contaminação de efluentes por amoxicilina: consequências ambientais e métodos de remoção. *Brazilian Journal of Science*, v. 1, n. 2, pp. 6–13, 2022.
- [SOUZA et al., 2022] SOUZA, L.; DEMARCHI, C.; RODRIGUES, C. Activation of termite feces with different chemical reagents and their effects on norfloxacin adsorption properties. *Revista Acta Ambiental Catarinense*, v. 19, n. 1, pp. 01–20, 2022.
- [SUN et al., 2021] SUN, Y., et al. The potential of biochar and lignin-based adsorbents for wastewater treatment: Comparison, mechanism, and application—a review. *Industrial Crops and Products*, v. 166, p. 113473, 2021.
- [TOFANELLO et al., 2021] TOFANELLO, A., et al. Photodegradation of ciprofloxacin-zinc complexes produced at the interface of ZnO and Cu-doped ZnO crystals. *Materials Research*, v. 24, n. 6, 2021.
- [TOLEDO et al., 2015] TOLEDO, F., et al. Composto de resíduos da fabricação de papel e celulose na produção de mudas de eucalipto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, pp. 711–716, 2015.
- [ONU, 2015] United Nations (ONU). *Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development*. 2015. General Assembly UN. 70th Session, ed A/RES/70/1 Geneva, Switzerland.
- [VINCENTIN et al., 2019] VINCENTIN, B. *Estudo da remoção do antibiótico amoxicilina em meio aquoso: utilização da perlita expandida e casca de pistache in natura como adsorventes*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Brasil, 2019.
- [VIOTTI et al., 2017] VIOTTI, P.; MOREIRA, W.; SCALINTE, M.; GIMENES, M. Estudo da caracterização e aplicabilidade da resina fenólica no

processo de adsorção de amoxicilina e azul de metileno. In: *X Encontro Internacional de Produção Científica*. Maringá, Brasil: [s.n.], 2017.

Utilização dos resíduos gerados na produção de *Oreochromis Niloticus* como fertilizante no cultivo de girassol

Francisco Ícaro Carvalho Aderaldo¹ e Franklin Aragão Gondim¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE,
Campus de Maracanaú, Brasil

1 Introdução

A piscicultura, é uma atividade que desenvolve o cultivo de peixes e outros organismos aquáticos. Essa prática tem movimentado importante parcela da economia brasileira. Dentre as espécies aquáticas criadas no Brasil, a *Oreochromis niloticus*, comumente conhecida como tilápia, é a que se encontra em maior estágio de desenvolvimento e cultivo, liderando a produção de carne de peixe [CARMO, 2020]. O ingresso de espécimes de tilápia no Brasil ocorreu em 1971 na Estação de Piscicultura do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) em Pentecoste no Estado do Ceará e sua produção foi desenvolvida principalmente no Nordeste brasileiro [SILVA et al., 2015].

Com o expressivo crescimento no consumo de tilápia, observa-se como consequência, um aumento na geração de resíduos, os quais por vezes, são destinados de formas inadequadas, causando problemas ambientais, tais como, poluição dos corpos hídricos, degradação de paisagens, contaminação do pedológica e surgimento de vetores transmissíveis de doenças.

Desta forma, técnicas de reutilização desses resíduos, que favorecem o aproveitamento por completo do peixe e que promovam práticas

sustentáveis na piscicultura, são necessárias. Uma das importantes maneiras de reutilização desse material, é a partir da formação de fertilizantes orgânicos, visto que o resíduo da tilápia apresenta grandes valores nutricionais [RIBEIRO et al., 2020], fundamentais para o desenvolvimento das plantas.

Diante disto, algumas plantas apresentam importantes características na geração de energia sustentável, dentre essas espécies, destaca-se a *Helianthus annuus* L., popularmente conhecida como girassol. Este vegetal, além de possuir grande potencial para produção de biocombustíveis, seu cultivo é possível em quase todo o Brasil, devido a sua boa capacidade adaptativa somada à sua resistência em condições adversas de clima e solo [SOARES et al., 2008, CAMPOS et al., 2015].

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo, debater sobre a viabilidade da utilização dos Resíduos de filetagem da tilápia como fertilizante orgânico, na composição de substratos para o cultivo de plantas de girassol.

2 Resíduo do Processamento Do Pescado

Os resíduos são definidos segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004) como todo material descartado resultante de atividades humanas. Estes resíduos, quando destinados ou processados de maneira incorreta, acarretam impactos negativos ao meio ambiente, gerando efeitos por vezes, irreversíveis para a sociedade [MOTA, 2009].

No processamento do pescado ocorre a geração de resíduos, caracterizados por pequenos pedaços de tecido muscular, cabeças, nadadeiras, escamas, vísceras, carcaça e pele [SUCASAS, 2011], estes constituem aproximadamente 65% do total do peixe, [SEIBEL & SOUZA, 2003] possuindo proteínas com alto grau de hidrólise. Segundo [OLIVEIRA et al., 2013], a melhor forma de manejar os resíduos é transformá-los em compostos orgânicos, tornando-os um possível fertilizante orgânico [SOUZA et al., 2029].

Transformar os materiais descartáveis e poluentes em coprodutos com valor agregado é de fundamental importância para o desenvolvimento sustentável. A reutilização dos resíduos de pescado juntamente com a redução do consumo inconsciente evitando desperdícios são condições essenciais que garantem processos mais econômicos e com menores impactos ao meio ambiente [LIMA, 2013].

2.1 Biocombustível

No decorrer do tempo, por consequência de várias mudanças climáticas e ideológicas, a questão ambiental transformou-se em um dos principais anseios da sociedade. Dessa forma, a comunidade em geral, demonstram-se mais conscientes com relação aos impactos da ação antrópica e de atividades não sustentáveis no meio ambiente [LIMONGI et al., 2013].

A demanda por novas fontes energéticas que possam substituir os combustíveis fósseis tem sido cada vez mais, visada pelos setores de produção e de consumo. Uma excelente opção para a substituição dos combustíveis fósseis por uma matéria mais sustentável é a utilização de biocombustíveis adquiridos através da matéria orgânica. O biodiesel por exemplo, é uma substância biodegradável, composta por ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, sua obtenção pode ser realizada por processos como o de transesterificação a partir de óleos vegetais ou gorduras animais [KINNAL et al., 2018].

Os óleos vegetais são bastante utilizados na fabricação de biodiesel [TEBAS et al., 2017]. Algumas espécies de plantas oleaginosas recebem destaque como matéria prima, como exemplo temos a mamona, a soja e também girassol [DINIZ et al., 2020]. Dessa forma, torna-se de fundamental importância pesquisas e estudos técnicos que busquem a otimização da produção dessas matérias primas.

2.2 Girassol

O girassol (*Helianthus annuus* L.) também conhecido como “flor do sol” devido à sua rotação sempre voltado para o Sol, é uma espécie dicotiledônea anual pertencente à família *Asteraceae* [JÚNIOR, 2001]. Essa oleaginosa é cultivada em todos os continentes do planeta. Isso acontece principalmente pois o girassol possui uma grande produção de sementes e por, agronomicamente, o vegetal mostrar-se bastante adaptado as variações geográficas e edafoclimáticas, além de ter um sistema radicular que propicia melhorias no solo em termos químicos, físicos e biológicos [SANTOS et al., 2015].

As características agrônômicas, físicas e organolépticas do girassol, torna-o uma espécie com grande versatilidade agrônômica [SANTOS et al., 2021]. A cultura desse vegetal, é utilizada em diversas áreas, como nas técnicas de manejo do solo, na ciclagem de nutrientes, geração de forragem, grãos e óleo para alimentação humana e animal, fabricação de mel,

utilização em ornamentações e na indústria de cosméticos [UNGARO, 2001, CASTRO & FARIAS, 2005, PERSON, 2013].

O cultivo de girassol, especialmente a partir do ano de 2005, recebeu grande interesse do meio produtivo, devido à notória possibilidade de utilização do óleo, derivado da semente, para a produção de biodiesel [BACKES et al., 2008]. As sementes do girassol são ricas em óleo, apresentando aproximadamente 40% da sua composição na forma de lipídeos [SMANIOTTO et al., 2020]. Dessa forma, a *Helianthus annuus* L. tornar-se uma ótima alternativa agrícola para a produção de biocombustíveis, principalmente para o semiárido brasileiro [BEZERRA, 2011].

3 Considerações Finais

É fundamental que novas pesquisas explorem alternativas sustentáveis para o gerenciamento de resíduos, particularmente aqueles resultantes da piscicultura e de outras indústrias de grande impacto ambiental. A reutilização de resíduos sólidos, que anteriormente eram descartados de maneira inadequada, representa uma abordagem ambientalmente proveitosa. Ao invés de serem um problema ambiental, esses resíduos podem ser transformados em fontes valiosas de nutrientes para o cultivo de plantas como o girassol, que é especialmente promissor para a produção de biocombustíveis.

O girassol, devido à sua adaptabilidade e alta produção de óleo, destaca-se como uma cultura viável para áreas de clima variado, incluindo o semiárido brasileiro. Sua capacidade de converter nutrientes residuais em biocombustíveis oferece uma solução de duplo impacto positivo: reduz a dependência de combustíveis fósseis e diminui a poluição ambiental associada ao descarte inadequado de resíduos.

Ao promover o uso de resíduos na agricultura para a produção de energia renovável, estamos também promovendo a economia circular, onde cada resíduo se torna um recurso. O cultivo do girassol a partir de fertilizantes orgânicos derivados de resíduos industriais demonstra como a integração de práticas agrícolas e energéticas pode ser uma ferramenta poderosa para a sustentabilidade. O desenvolvimento de biocombustíveis a partir de recursos renováveis e locais como o girassol não apenas contribui para a diversificação da matriz energética, mas também fortalece as economias regionais e minimiza o impacto ambiental.

Diante disso, é essencial continuar incentivando o estudo e a aplicação de soluções inovadoras que utilizem recursos locais de maneira inteligente e eficiente. Esse caminho, que une pesquisa e práticas sustentáveis, aponta para um futuro mais verde e economicamente viável, no qual a reutilização de resíduos e o cultivo de plantas energéticas desempenham papéis essenciais na construção de um mundo mais sustentável.

Referências Bibliográficas

- [BACKES et al., 2008] BACKES, R.; SOUZA, A.; JUNIOR, A.; GALLOTTI, G.; BAVARESCO, A. Desempenho de cultivares de girassol em duas épocas de plantio de safrinha no planalto norte catarinense. *Scientia Agraria*, v. 9, n. 1, pp. 041–048, 2008.
- [BEZERRA, 2011] BEZERRA, L. *Caracterização dos níveis de resistência à salinidade em cultivares de girassol (Helianthus annuus L.)*. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró-RN, 2011.
- [CAMPOS et al., 2015] CAMPOS, V.; CHAVES, L.; GUERRA, H. Adubação com npk e irrigação do girassol em luvisolo: Comportamento vegetativo. *Revista Ambiente & Água*, 2015.
- [CARMO, 2020] CARMO, F. *Caracterização físico-química e aceitabilidade sensorial do filé de Tilápia-do-Nilo cultivada em diferentes ambientes*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.
- [CASTRO & FARIAS, 2005] CASTRO, C.; FARIAS, J. Ecofisiologia do girassol. In: *Girassol no Brasil*. Londrina: Embrapa Soja, 2005. v. 1, pp. 501–546.
- [JÚNIOR, 2001] JÚNIOR, C. *A cultura do girassol*. Guaíba: Agropecuária, 2001.
- [SILVA et al., 2015] SILVA, G.; MACIEL, L.; DALMASS, M.; GONÇALVES, M. *Tilápia-do-Nilo Criação e cultivo em viveiros no estado do Paraná*. 2015.
- [LIMA, 2013] LIMA, L. *Reaproveitamento de resíduos sólidos na cadeia agroindustrial do pescado*. 2013.
- [OLIVEIRA et al., 2013] OLIVEIRA, A.; OLIVEIRA, S.; BRUNO, F.; FREITAS, J. Avaliação microbiológica da silagem biológica de resíduos de pescado

- das indústrias de filetagem de tilápia do nilo (*oreochromis niloticus*). *Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal*, 2013.
- [SOUZA et al., 2029] SOUZA, J.; OLIVEIRA, S.; AZEVEDO, A. Avaliação do ganho de biomassa de alevinos de tilápia (*oreochromis niloticus*) alimentados com silagem biológica de resíduos de pescado. *Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal*, 2009.
- [DINIZ et al., 2020] DINIZ, P.; SOUSA, O.; SOUSA, G.; SILVA, R.; MOTA, F. Efeitos de diferentes proporções de esterco bovino no desenvolvimento do girassol. *Diversitas Journal*, v. 5, n. 4, pp. 2464–2472, 2020.
- [SANTOS et al., 2021] SANTOS, J.; PEIXOTO, C.; SILVA, M.; ALMEIDA, A.; CASTRO, A.; CARLI, P.; OLIVEIRA, E. Características agrônômicas do girassol em consórcio no sistema ilp. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 1, pp. 10481–10493, 2021.
- [KINNAL et al., 2018] KINNAL, N.; SUJAYKUMAR, G.; D’COSTA, S.; GIRISHKUMAR, G. Investigation on performance of diesel engine by using waste chicken fat biodiesel. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [S.l.: s.n.], 2018. v. 376, n. 1.
- [LIMONGI et al., 2013] LIMONGI, B.; PFITSCHER, E.; SPLITTER, K. Sustentabilidade ambiental: Estudo em uma indústria de pescados. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 6, n. 1, 2013.
- [MOTA, 2009] MOTA, J.; ALMEIDA, M.; ALENCAR, V.; CURI, W. Características e impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos: uma visão conceitual. *Águas Subterrâneas*, 2009.
- [ABNT, 2004] NBR, ABNT. *Resíduos sólidos: Classificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- [PERSON, 2013] PERSON, L. Ótima opção para o agronegócio brasileiro. *AgroANALYSIS*, v. 33, n. 2, pp. 27–28, 2013.
- [RIBEIRO et al., 2020] RIBEIRO, S.; PAULA, M.; CASTRO, J. Silagem ácida de resíduos de filetagem de duas espécies de peixes amazônicos para utilização em ração animal. *Revista Virtual de Química*, 2020.
- [SANTOS et al., 2015] SANTOS, A.; PEIXOTO, C.; ALMEIDA, A.; SANTOS, J.; MACHADO, G. Tamanho ótimo de parcela para a cultura de girassol em três arranjos espaciais de plantas. *Revista Caatinga*, v. 28, n. 4, pp. 265–273, 2015.

- [SEIBEL & SOUZA, 2003] SEIBEL, N.; SOUZA, S. Produção de silagem química com resíduos de pescado marinho. *Brazilian Journal of Food Technology*, 2003.
- [SMANIOTTO et al., 2020] SMANIOTTO, T.; RESENDE, O.; SOUSA, K.; RODRIGUES, G.; BESSA, J.; RESENDE, L. Qualidade fisiológica de sementes de girassol armazenadas em diferentes embalagens. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 6, 2020.
- [SOARES et al., 2008] SOARES, L.; ARAÚJO, E.; ALVES, B.; BODDEY, R.; URQUIAGA, S. *Eficiência energética comparada das culturas do girassol e soja, com aptidão para a produção de biodiesel no Brasil*. 2008.
- [SUCASAS, 2011] SUCASAS, L. *Avaliação do resíduo do processamento de pescado para o desenvolvimento de co-produtos visando o incremento da sustentabilidade na cadeia produtiva*. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 2011.
- [TEBAS et al., 2017] TEBAS, S.; PEREIRA, A.; SILVA, P.; PINHEIRO, P.; PINHEIRO, C.; BARÁNANO, A. Obtenção de biodiesel. In: *Blucher Chemical Engineering Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2017. v. 4, n. 1, pp. 100–104.
- [UNGARO, 2001] UNGARO, M. Mercados potenciais para o girassol e os seus subprodutos. In: *O agronegócio das plantas oleaginosas: Algodão, amendoim, girassol e mamona*. Piracicaba: ESAQ, 2001. pp. 12–140.

Inibidores de Corrosão

Antonio Jonatas da Silva Barros¹ e Marcelo Monteiro Valente Parente²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE,
Campus de Maracanaú, Brasil

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE,
Campus de Caucaia, Brasil

1 Introdução

A corrosão é um processo natural em que metais e ligas tendem a retornar ao seu estado termodinâmico mais estável, resultando de reações químicas ou interações com o ambiente [ZAKERI et al., 2022]. Esse fenômeno pode causar danos significativos, tanto em ambientes domésticos quanto industriais, gerando consequências econômicas e ambientais consideráveis [NORONHA & CUNHA, 2020].

A corrosão se caracteriza pela deterioração de materiais, geralmente metálicos, que ocorre devido a reações químicas ou eletroquímicas com o ambiente ao qual estão expostos, podendo ou não estar relacionada a esforços mecânicos. Esses processos são espontâneos e irreversíveis, representando o oposto do processo siderúrgico, já que a corrosão do metal oxida o ferro, liberando a energia utilizada na conversão do minério em metal [SANTORO, 2022].

A ferrugem, também conhecida como Fe_2O_3 hidratado, é um dos produtos da corrosão e corresponde à hematita, o óxido de ferro mais comum, amplamente utilizado na produção de aço. Essa transformação representa o retorno do metal ao seu estado de menor energia [SANTORO, 2022].

De acordo com [SOUSA et al., 2019], monitorar o comportamento dos aços em ambientes agressivos é fundamental para evitar grandes perdas econômicas resultantes da interrupção da produção em plantas industriais, bem como para prevenir acidentes com impactos sociais e ambientais significativos, incluindo a perda de vidas. No Brasil, estima-se que os custos relacionados a danos provocados pela corrosão representem 3,5% do PIB, totalizando aproximadamente R\$ 219 bilhões em 2016.

É importante ressaltar que as estruturas de aço carbono sofrem danos a sua integridade quando expostas a ambientes adversos, como aqueles com altas concentrações de sal ou em meios ácidos, situação comum na indústria petroquímica, que é particularmente afetada pela corrosão. Calcula-se que cerca de 20% do aço produzido seja utilizado para substituir peças e componentes corroídos, o que representa cerca de 400 mil toneladas, com base na produção global de aço em 2021 [SANTORO, 2022].

Esse problema tem contribuído para o esgotamento de recursos naturais, redução da eficiência e perdas econômicas significativas. Portanto, prever e proteger os materiais contra a corrosão se tornou uma questão crucial para a indústria contemporânea. Para enfrentar esses desafios, diversas pesquisas experimentais e teóricas têm sido realizadas nas últimas décadas [CHEN et al., 2022, GURJAR et al., 2021].

O monitoramento da corrosão é realizado por meio de técnicas que detectam alterações no comportamento de materiais e componentes em face do processo corrosivo, o que facilita a compreensão desse fenômeno [NORONHA & CUNHA, 2020]. A corrosão ocorre através de um processo de oxidação eletroquímica, onde o metal transfere elétrons para o ambiente, passando de um estado de valência zero para um estado positivo [GURJAR et al., 2021].

[KOBZAR & FATYEEVA, 2021] explicam que os elétrons se movem através da estrutura metálica até a superfície, onde se combinam com oxigênio e água para formar íons hidroxila ou reagem com prótons, gerando hidrogênio (evolução catódica do hidrogênio). Os íons Fe^{2+} se dissolvem na solução ao redor e, em seguida, reagem com os íons hidroxila, formando hidróxidos ferrosos. Esses hidróxidos são oxidados pelo ar, resultando em óxidos férricos hidratados, conhecidos como ferrugem vermelha.

A escolha cuidadosa dos materiais é a abordagem mais comum para prevenir a corrosão; no entanto, é crucial considerar que existem diversos materiais adequados para cada situação específica. Entre os critérios para a seleção de materiais, destacam-se aspectos financeiros, disponibilidade, conformação e compatibilidade com o processo [NORONHA & CUNHA, 2020].

O desenvolvimento de novos materiais resistentes aos efeitos adversos de ambientes corrosivos é fundamental para a redução dos custos gerais [KARAHAN et al., 2022]. Garantir que os materiais metálicos tenham proteção contra a corrosão tornou-se uma tarefa urgente na pesquisa contemporânea [BERDIMURODOV et al., 2021].

Diversas estratégias podem ser adotadas para evitar a corrosão em superfícies metálicas, incluindo proteções catódicas e anódicas, inibidores de corrosão, uso de revestimentos orgânicos ou inorgânicos, e desenvolvimento de ligas metálicas com maior resistência química [SENISKI et al., 2020]. Uma das abordagens mais eficazes é o uso de inibidores de corrosão sintéticos, que se destacam por seu custo-benefício e facilidade de aplicação na indústria [GURJAR et al., 2021]. Entretanto, muitos desses inibidores são prejudiciais ao meio ambiente, contendo cromatos e fosfatos altamente tóxicos, o que levanta preocupações junto a autoridades internacionais [SOUSA et al., 2019].

2 Inibidores de Corrosão

Os inibidores de corrosão são aditivos químicos que têm a capacidade de diminuir a corrosão de metais em ambientes hostis. Em comparação com outras técnicas de proteção contra corrosão, os inibidores se destacam pela não necessidade de equipamentos especializados, facilidade de uso e custo acessível [GAO et al., 2022].

Atualmente, a utilização de inibidores como modificadores do ambiente é fundamental para suprimir ou mitigar processos corrosivos. O ambiente pode ser líquido, gasoso ou uma mistura híbrida de solo e líquido, sendo frequentemente chamado de eletrólito devido à sua capacidade de condução elétrica [GURJAR et al., 2021]. A adoção desses inibidores na indústria é respaldada por suas notáveis propriedades anticorrosivas, sendo amplamente utilizados em refinarias, tubulações de sistemas de resfriamento, caldeiras e em operações de extração de petróleo e gás [SOUSA et al., 2019].

Atualmente, inibidores de corrosão orgânicos, que normalmente atuam como barreira bloqueando o processo corrosivo, são utilizados amplamente para proteger o aço em ambientes severos [KOBZAR & FATYEEVA, 2021]. No entanto, é importante ressaltar que muitos desses inibidores são altamente tóxicos, o que restringe sua aplicação em larga escala [GAO et al., 2022]. A maioria desses inibidores de corrosão apresenta uma estrutura anfifílica, composta por uma cabeça polar e uma

cauda apolar. A cabeça polar se adsorve na superfície metálica, enquanto a cauda, normalmente um hidrocarboneto, proporciona proteção hidrofóbica ao aço [HERNÁNDEZ-BRAVO et al., 2022].

O desempenho desses inibidores é frequentemente avaliado por meio de medições de perda de massa e técnicas eletroquímicas, como curvas de polarização e impedância eletroquímica [ROCHA & GOMES, 2017]. Embora existam diversas metodologias eletroquímicas, as mais utilizadas incluem medições de potencial, resistência de polarização linear e impedância eletroquímica. As medições de potencial são realizadas com o uso de eletrodos e voltímetros para determinar o potencial do eletrodo do metal em um meio corrosivo. A resistência de polarização linear é obtida a partir da extrapolação das curvas de Tafel, aplicando técnicas de proteção anódica e catódica, resultando em um gráfico que permite calcular a corrente de corrosão [NORONHA & CUNHA, 2020].

2.1 Classificação de inibidores

Os inibidores de corrosão são frequentemente classificados em três categorias: inibidores catódicos, anódicos e de adsorção [COSTA, 2019]. Um inibidor de corrosão é uma substância que, quando introduzida em concentrações apropriadas em um meio corrosivo, diminui de maneira significativa a taxa de corrosão. A escolha do inibidor ideal para um processo específico demanda um entendimento profundo de suas propriedades, das condições ótimas para sua eficácia e controle, bem como dos mecanismos pelos quais atuam [SANTORO, 2022].

2.1.1 Quanto ao mecanismo de proteção – Inibidores anódicos

Os inibidores anódicos atuam inibindo as reações que ocorrem no ânodo, ou seja, eles atrasam ou impedem essas reações. Normalmente, esse tipo de inibidor funciona ao reagir com os produtos de corrosão inicialmente formados, criando um filme aderente na superfície do metal que é altamente insolúvel. Essa barreira física entre o metal e o ambiente reduz a passagem de corrente elétrica, o que, por sua vez, diminui a taxa de corrosão [SANTORO, 2022].

Devido a essa função, os inibidores anódicos são frequentemente referidos como passivadores. Um dos resultados da ação desses inibidores é a elevação do potencial de corrosão do metal, tornando-o mais nobre [SOUZA, 2022]. Entre os exemplos comuns de substâncias oxidantes utilizadas como

inibidores anódicos de corrosão, estão cromatos, nitritos e nitratos. No entanto, é importante ressaltar que o uso de inibidores à base de cromato é proibido devido à sua toxicidade, uma vez que os compostos de cromo hexavalente (Cr^{6+}) são considerados carcinogênicos [SANTORO, 2022].

2.1.2 Quanto ao mecanismo de proteção – Inibidores catódicos

Os inibidores catódicos são compostos insolúveis que se depositam na área do cátodo, dificultando a difusão de oxigênio e a condução de elétrons, o que, por sua vez, inibe o processo catódico. De forma simplificada, os inibidores catódicos podem ser definidos como substâncias que reduzem as reações que ocorrem no cátodo [COSTA, 2019].

Os principais exemplos de inibidores catódicos incluem sulfatos de zinco, sulfatos de magnésio e sulfatos de níquel [COSTA, 2019]. Esses inibidores atuam nas reações catódicas ao interagir com os íons hidroxila (OH^-) que se acumulam nas proximidades dessas áreas, formando compostos insolúveis. Esses compostos obstruem as regiões catódicas da superfície metálica, dificultando a difusão de oxigênio resultando em uma redução na taxa de corrosão [SANTORO, 2022].

2.1.3 Quanto ao mecanismo de proteção – Inibidores de adsorção

Inibidores que funcionam por meio da adsorção são compostos que se fixam na superfície do metal, formando uma camada protetora que diminui a interação entre o metal e o ambiente corrosivo. Esse processo de adsorção pode ocorrer por diferentes tipos de interações, como forças de van der Waals, ligações de hidrogênio ou interações eletrostáticas, dependendo das características químicas do inibidor e do material metálico [COSTA, 2019].

Quando esses inibidores são adicionados a um ambiente corrosivo, eles se adsorvem à superfície metálica, criando uma barreira que dificulta a penetração de agentes corrosivos, como íons de oxigênio e íons cloreto. A adsorção atua inibindo as reações eletroquímicas na superfície do metal, resultando em uma diminuição da taxa de corrosão.

Os inibidores de adsorção geralmente incluem compostos orgânicos, como aminas, tióis e ácidos orgânicos, que contêm grupos funcionais que podem se ligar ao metal. Algumas características que tornam um inibidor eficaz por adsorção são: alta afinidade de adsorção ao metal; a capacidade de formar um filme protetor estável e resistente ao desgaste; e

baixa solubilidade em água, o que garante que permaneça na superfície do metal [SANTORO, 2022].

2.1.4 Quanto à sua natureza química – Inibidores inorgânicos

Os inibidores inorgânicos tradicionais incluem, por exemplo, cromatos inorgânicos, nitratos inorgânicos, molibdatos, nitratos orgânicos, carbonatos, silicatos, fosfatos e compostos orgânicos que contêm heteroátomos como nitrogênio, enxofre, fósforo e oxigênio. Embora esses compostos sejam amplamente utilizados, muitos deles apresentam toxicidade e são considerados poluentes. O uso de vários inibidores inorgânicos, especialmente os que contêm fosfatos e cromatos, está sendo gradualmente restringido ou banido por diferentes regulamentações ambientais em virtude de sua toxicidade [POSSANI, 2021].

2.1.5 Quanto à sua natureza química – Inibidores orgânicos

Os inibidores orgânicos funcionam por meio do mecanismo de adsorção, no qual as interações entre o adsorvente (superfície metálica) e o adsorvato (inibidor) podem ser de natureza física ou química. Quando as interações entre o metal e o inibidor são predominantemente do tipo van der Waals (como dipolo-dipolo ou dipolo-dipolo induzido), são classificadas como fisissorção [SANTORO, 2022].

Por meio da adsorção, os inibidores orgânicos se fixam à superfície do metal, promovendo sua passivação. Nesse sentido, os compostos orgânicos apresentam vantagens em relação aos inorgânicos, pois formam um filme passivo mais uniforme. Em contrapartida, os inibidores inorgânicos tendem a resultar em filmes porosos e frágeis, o que pode aumentar o risco de corrosão localizada [SANTORO, 2022].

A eficácia das camadas de proteção geradas pelos inibidores de adsorção é influenciada por diversos fatores, como a velocidade do fluido, o volume e a concentração do inibidor utilizado, a temperatura do sistema, o tipo de substrato que favorece a adsorção do inibidor, o tempo de contato entre o inibidor e a superfície metálica, além da composição do fluido do sistema [COSTA, 2019].

Esse tipo de adsorção é facilmente reversível com o aumento da temperatura, devido a parâmetros termoquímicos ($\Delta G > -20$ kJ/mol) que indicam sua menor espontaneidade. Por outro lado, os inibidores que atuam por quimissorção apresentam $\Delta G > -40$ kJ/mol, e sua adsorção tende a

ser irreversível devido à ligação química formada entre o metal e o inibidor. Esse fenômeno pode ser explicado pela teoria ácido-base de Lewis, onde o inibidor atua como a espécie básica, possuindo elétrons disponíveis para transferência para a superfície metálica, que é considerada um ácido de Lewis em virtude dos orbitais *d* vazios dos átomos de ferro, por exemplo, no aço [SANTORO, 2022].

2.1.6 *Quanto à sua natureza química – Inibidores orgânicos sintéticos*

Os inibidores sintéticos são amplamente empregados nas indústrias devido à sua capacidade de adsorção, essencial para prevenir a corrosão em sistemas metálicos. Entretanto, o uso desses compostos levanta preocupações, pois, apesar de sua elevada eficácia, muitos contêm substâncias como cromatos e nitratos, que são extremamente tóxicas mesmo em baixas concentrações. Essa toxicidade os torna poluentes significativos e contribui para o aumento dos custos operacionais e de conformidade ambiental [CARVALHO et al., 2020]. Essa situação destaca a necessidade de desenvolver alternativas menos prejudiciais que ofereçam proteção contra a corrosão sem os impactos ambientais associados aos inibidores convencionais.

2.1.7 *Quanto à sua natureza química – Inibidores orgânicos naturais ou inibidores verdes*

Para contornar as desvantagens associadas aos inibidores orgânicos sintéticos, os extratos vegetais surgiram como alternativas seguras e eficazes devido à sua origem natural e à sua natureza não tóxica [GURJAR et al., 2021]. Os inibidores naturais, provenientes de extratos de plantas ou de materiais biodegradáveis, demonstraram potencial para reduzir a dissolução de metais, contribuindo assim para a diminuição das taxas de corrosão [ROCHA & GOMES, 2017]. Além dos extratos vegetais, esses inibidores podem incluir líquidos iônicos, surfactantes, biopolímeros, aminoácidos, fármacos e sais solúveis de metais raros [SOUZA, 2022].

Vários estudos têm investigado o uso de produtos naturais como inibidores de corrosão, especialmente em relação ao aço-carbono, um material amplamente empregado devido ao seu baixo custo, adequadas propriedades mecânicas e facilidade de processamento [ROCHA & GOMES, 2017]. Os chamados “inibidores verdes” são valorizados por serem atóxicos, biodegradáveis e por não conterem metais pesados, evitando assim a geração de resíduos poluentes durante sua produção, uso ou descarte [POSSANI, 2021].

Além da eficácia e das características dos inibidores verdes, é essencial avaliar o custo-benefício e o impacto ambiental dos processos envolvidos em sua produção. Os inibidores derivados de resíduos da indústria agropecuária se mostram promissores, pois, além de serem não tóxicos, oferecem uma destinação adequada para resíduos que, de outra forma, seriam descartados, agregando valor à cadeia produtiva. Contudo, é fundamental que o processo de extração desses inibidores a partir de resíduos também seja ambientalmente sustentável [SOUZA, 2022].

3 Considerações Finais

Este trabalho proporcionou uma introdução abrangente aos conceitos e classificações dos inibidores de corrosão, destacando sua importância para a proteção de materiais metálicos em ambientes agressivos. A corrosão é um desafio industrial significativo, com impactos econômicos e ambientais, e os inibidores desempenham um papel essencial na mitigação desses efeitos.

É fundamental que o estudo de inibidores de corrosão continue a se expandir, explorando não apenas os métodos tradicionais, mas também investigando alternativas mais sustentáveis e menos prejudiciais ao meio ambiente. A incorporação de inibidores verdes, derivados de fontes naturais e biodegradáveis, surge como uma abordagem promissora que oferece proteção eficiente enquanto minimiza os impactos negativos associados aos inibidores sintéticos tradicionais.

Além disso, a inovação no desenvolvimento de inibidores capazes de enfrentar novos desafios industriais é crucial. Isso inclui o avanço de técnicas de monitoramento da corrosão e o aperfeiçoamento de inibidores que possam ser aplicados de maneira eficaz e econômica em grande escala. O compromisso contínuo com a pesquisa e o desenvolvimento de inibidores de corrosão permitirá que a indústria se adapte a ambientes corrosivos cada vez mais complexos, preservando a integridade estrutural e contribuindo para um futuro industrial mais sustentável.

Referências Bibliográficas

[BERDIMURODOV et al., 2021] BERDIMURODOV, E., et al. Novel bromide–cucurbit[7]uril supramolecular ionic liquid as a green corrosion inhibitor for the oil and gas industry. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, v. 901, n. October, p. 20, 2021.

- [CARVALHO et al., 2020] CARVALHO, K., et al. Extrato da casca de laranja como inibidor de corrosão. *Revista Exatamente Newton*, v. 1, pp. 125–134, 2020.
- [CHEN et al., 2022] CHEN, Z., et al. Development of a bv-tddft model for metal corrosion in aqueous solution. *Chemical Engineering Science*, v. 248, p. 117267, 2022.
- [COSTA, 2019] COSTA, V. *Avaliação Do Nonilfenol Etoxilado 9,5 Como Inibidor De Corrosão Do Aço Sae 1020 Em Meio Salino Através Da Técnica De Espectroscopia De Impedância Eletroquímica* – Universidade Federal Rural do Semiárido, 2019.
- [ROCHA & GOMES, 2017] ROCHA, J.; GOMES, J. Inibidores de corrosão naturais: proposta de obtenção de produtos ecológicos de baixo custo a partir de resíduos industriais. *Revista Materia*, v. 22, pp. 1–10, 2017.
- [GAO et al., 2022] GAO, X., et al. Pyrazole ionic liquid corrosion inhibitor for magnesium alloy: Synthesis, performances and theoretical explore. *Journal of Molecular Liquids*, v. 353, p. 118769, 2022.
- [GURJAR et al., 2021] GURJAR, S., et al. Performance of imidazolium based ionic liquids as corrosion inhibitors in acidic medium: A review. *Applied Surface Science Advances*, v. 6, p. 100170, 2021.
- [HERNÁNDEZ-BRAVO et al., 2022] HERNÁNDEZ-BRAVO, R., et al. Experimental and theoretical study on the effectiveness of ionic liquids as corrosion inhibitors. *Computational and Theoretical Chemistry*, v. 1210, n. February, p. 11, 2022.
- [KARAHAN et al., 2022] KARAHAN, H.; AMINIFAZL, A.; GOLDEN, T. Effect of tmab concentration on structural, mechanical and corrosion properties of electrodeposited ni–b alloys. *Journal of the Indian Chemical Society*, v. 99, n. April, p. 100467, 2022.
- [KOBZAR & FATYEEVA, 2021] KOBZAR, Y.; FATYEEVA, K. Ionic liquids as green and sustainable steel corrosion inhibitors: Recent developments. *Chemical Engineering Journal*, v. 425, n. July, p. 131480, 2021.
- [NORONHA & CUNHA, 2020] NORONHA, D.; CUNHA, J. *Inibidores de corrosão da linha verde: Estado da arte*. 2020. pp. 1–12.

- [SOUSA et al., 2019] SOUSA, J., et al. Study of the efficiency of orbignya oleifera as a green corrosion inhibitor for low carbon steel compared to commercial inhibitor in 1m hcl solution. *Revista Materia*, v. 24, n. 3, p. 13, 2019.
- [POSSANI, 2021] POSSANI, G. Tecnologia verde: ácido tânico como inibidor de corrosão para o aço carbono. 2021. Nota técnica.
- [SANTORO, 2022] SANTORO, A. *Síntese e avaliação de novos híbridos 1,2,4-triazol-isatina como inibidores de corrosão do aço-carbono para aplicação na indústria de petróleo e gás* – Universidade Federal Fluminense, 2022.
- [SENISKI et al., 2020] SENISKI, A., et al. Estudo do desempenho do aço carbono aisi 1010 sob o efeito de barreira de revestimento epóxi/hdl-zn-al-no2- como inibidor de corrosão, via espectroscopia de impedância eletroquímica. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 2, p. 11, 2020.
- [SOUZA, 2022] SOUZA, P. *Avaliação da eficiência do pó de semente de abacate (persea americana) como inibidor da corrosão do aço galvanizado em meio ácido* – Universidade Federal de Minas Gerais, 2022.
- [ZAKERI et al., 2022] ZAKERI, A.; BAHMANI, E.; AGHDAM, A. Plant extracts as sustainable and green corrosion inhibitors for protection of ferrous metals in corrosive media: A mini review. *Corrosion Communications*, p. 41, 2022.

Células fotovoltaicas de silício policristalino: defeitos microestruturais e sua caracterização

Caio Façanha de Oliveira¹ e Francisco Nélio Costa Freitas²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE,
Campus de Maracanaú, Brasil

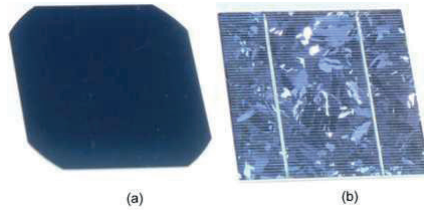
²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE,
Campus de Fortaleza, Brasil

1 Introdução

Células de silício cristalino fazem parte da primeira geração de células fotovoltaicas desenvolvidas na década de 1950, podendo ser de silício monocristalino (mono-Si) ou silício policristalino (poli-Si) [OGBOMO et al., 2017]. A principal diferença entre os dois materiais está na microestrutura: o mono-Si consiste em apenas um único cristal (ou grão), enquanto o poli-Si é composto por vários grãos, que são evidentes na célula solar (Figura 1).

As células de mono-Si são fabricadas a partir de lingotes de um único cristal de silício produzido pelo processo de fabricação complexo e de alta demanda energética, como o processo Czochralski (CZ), enquanto as células de poli-Si são obtidas de lingotes policristalinos fabricados por fundição de silício em cadinhos, geralmente pelo método de solidificação direcional [SAGA, 2010]. Por conta disso, as células de poli-Si são mais baratas e o período necessário para o sistema fotovoltaico gerar a mesma quantidade de energia que foi usada para produzi-lo também é menor [AGHAEI et al., 2022].

Figura 1. (a) Célula fotovoltaica de silício monocristalino e (b) célula fotovoltaica de silício policristalino.



Fonte: [OGBOMO et al., 2017].

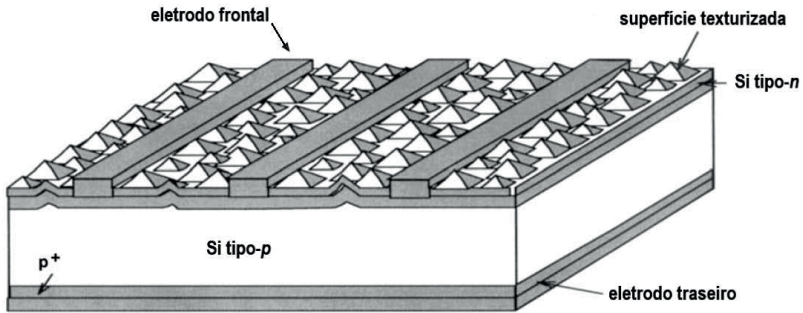
Embora sejam uma alternativa de menor custo em relação ao mono-Si, as células de poli-Si são menos eficientes por apresentarem mais defeitos na sua estrutura cristalina. Esse capítulo aborda inicialmente o princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica, em seguida serão discutidos dois defeitos cristalinos que interferem a microestrutura do silício e, por fim, técnicas para detectar esses defeitos e relacionados com a eficiência das células.

2 Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica

Uma célula fotovoltaica é um dispositivo eletrônico que utiliza materiais semicondutores para converter a energia obtida do sol em energia elétrica. Na Figura 2 é mostrado um desenho da estrutura de uma célula fotovoltaica com substrato de silício Si tipo-*p* (base, com carga positiva) e Si tipo-*n* (emissor, com carga negativa). A célula possui eletrodos frontais fabricados em prata e um eletrodo traseiro de alumínio com uma camada traseira utilizada para reduzir as perdas por recombinação denominada BSF (*Back Surface Field*, indicada por p+). Além disso, a superfície da parte superior da célula é texturizada com estruturas piramidais de tamanho micrométrico com revestimento de nitreto de silício (SiN_x) ou óxido de titânio (TiO_x), a fim de reduzir as perdas por reflexão da luz incidente [ALAAEDDIN et al., 2019].

A camada do emissor é geralmente obtida pela difusão de fósforo na superfície dopada com boro. A adição de fósforo como impureza no silício resulta em um elétron extra ao redor do átomo de fósforo com baixa energia de ligação, ou seja, pode ser facilmente removido dessa região, se tornando um elétron livre e conferindo carga negativa ao material. O efeito oposto é

Figura 2. Estrutura de uma célula fotovoltaica.



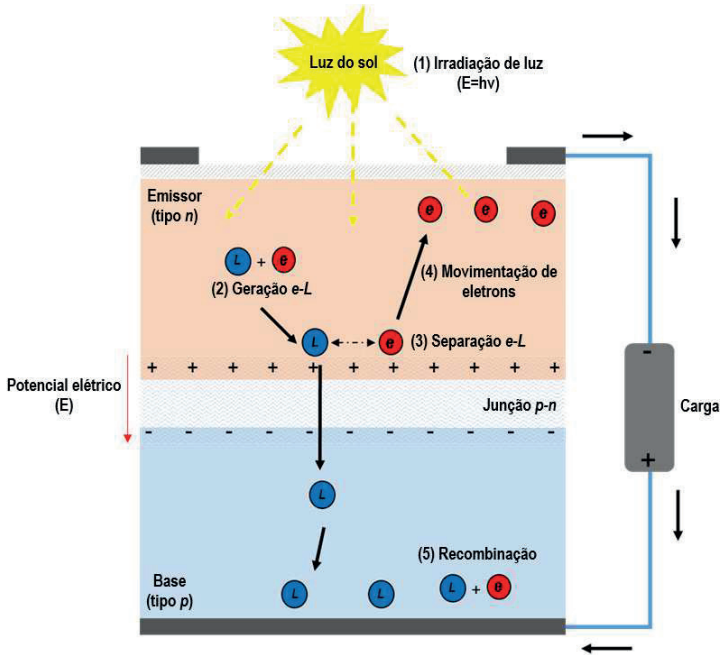
Fonte: Adaptado de [GREEN, 2002].

alcançado com a adição de boro, que possui uma deficiência de elétrons em relação ao silício, o que pode ser visto como uma lacuna que se movimentava com a transferência de um elétron de um átomo adjacente.

A região entre os Si tipo- p e o Si tipo- n é chamada de junção $p-n$ e é formada com a difusão dos elétrons e das lacunas na interface entre os dois semicondutores com excesso de cargas opostas. Com a junção $p-n$ é estabelecido um campo elétrico dentro que atua como uma barreira que impede a passagem direta de cargas da camada negativa (emissor) para a camada positiva (base).

O princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica é ilustrado na Figura 3. A energia de fótons da luz solar que incide na célula desloca os elétrons com baixa energia de ligação, gerando pares elétron-lacuna. Devido ao forte campo elétrico da junção $p-n$, ocorre a separação dos pares, com os elétrons fluindo para o emissor e as lacunas fluindo para a base. Isso cria uma tensão elétrica na célula e uma movimentação de elétrons do emissor para uma carga externa, que fornece um caminho de retorno à base da célula. Após saírem da carga externa, os elétrons recombinam-se com as cargas positivas da base enquanto novos pares elétron-lacuna são criados repetidamente para geração contínua de eletricidade [KIM et al., 2021].

Figura 3. Funcionamento de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Adaptado de [KIM et al., 2021].

3 Defeitos microestruturais no silício policristalino

Materiais cristalinos possuem átomos ordenados em um padrão que se repete periodicamente em três dimensões por extensas distâncias atômicas. Essa disposição dos átomos pode ser desordenada localmente pela presença de defeitos na rede cristalina, capazes de modificar drasticamente as propriedades de um material. A classificação desses defeitos é de acordo com sua geometria ou dimensionalidade, podendo ser pontuais (lacunas e autointersticiais), lineares (discordâncias), interfaciais (contornos de grão e de macla) ou impurezas.

3.1 Contornos de grão

Um material policristalino possui vários cristais (ou grãos), que são conjuntos de átomos que possuem a mesma orientação cristalográfica. A interface entre

dois cristais é chamada de contorno de grão. Embora sejam os defeitos mais comuns no silício policristalino, eles possuem um impacto baixo nas propriedades elétricas do poli-Si. Isso se dá porque o tamanho de grão do poli-Si geralmente é maior que o comprimento de difusão dos portadores de carga, ou seja, durante a movimentação dos elétrons de um ponto A até um ponto B (onde ocorre recombinação) é pouco provável que haverão contornos de grão dificultando a movimentação dos elétrons, assim os contornos não vão contribuir para o gerando espalhamento e para recombinação precoce na célula [ARAFUNE et al., 2006].

Entretanto, regiões com altas concentrações de contornos de grãos apresentam atividade recombinativa mais intensa, o que é explicado parcialmente pelo potencial eletrostático nos contornos, que podem atuar como barreiras que dificultam a passagem de elétrons [SAMADI et al., 2022]. Os contornos também impedem a difusão de outros defeitos na rede cristalina, servindo como sítio para aglomeração principalmente de discordâncias e impurezas, que afetam diretamente a movimentação dos portadores de carga [VECCHI et al., 2021]. Além da concentração de contornos no material, o ângulo de *misorientation* (desalinhamento) entre dois grãos de um contorno também influencia na velocidade com que os portadores de carga sofrem recombinação [MITAMURA et al., 2020].

Os tipos de contornos de grãos mais encontrados em silício policristalino são contornos de ângulo aleatório, contornos CSL (*Coincidence Site Lattice*) com índice de coincidência $\Sigma 3$ e contornos de grão de baixo ângulo. Os contornos de ângulo aleatório contribuem para redução de discordâncias eletricamente ativas no material, pois permitem um alívio melhor de tensões térmicas. Contornos $\Sigma 3$ ocorrem em sua maioria em contornos de maclas, quando dois grãos adjacentes possuem um plano de interface $\{111\}$ entre eles. Os contornos de baixo ângulo possuem desorientação menor que 15° e são estruturalmente equivalentes a uma linha de discordâncias empacotadas, sendo eletricamente ativos e considerados os mais prejudiciais às propriedades do poli-Si. Após o processamento padrão das células, a maioria dos contornos aleatórios são passivados, e a atividade recombinativa e concentra mais em contornos de baixo ângulo e $\Sigma 3$ [ADAMCZYK et al., 2018a].

Contornos de grão de ângulo aleatório representam a maior fração de comprimento de contornos no meio e no topo dos lingotes (regiões com maiores tamanhos de grão) seguido por contornos $\Sigma 3$, que são a maioria nas regiões próximas ao fundo (regiões com menores tamanhos de grão) em lingotes convencionais [TREMPE et al., 2017].

3.2 Discordâncias

As discordâncias são defeitos lineares na estrutura cristalina associados com ligações atômicas pendentes, podendo atuar como centros de recombinação ativos reduzindo o comprimento de difusão dos portadores de carga e, portanto, tem um forte impacto na qualidade do material e no desempenho final da célula [KRISTENSEN, 2020]. Elas tem sua principal origem no o processo de solidificação direcional do poli-Si, iniciando no fundo dos lingotes e provocando multiplicação de outras discordâncias a medida que o silício líquido vai se solidificando [WANG et al., 2024]. Nesse processo os contornos de grão possuem um impacto significativo, visto que a probabilidade de ocorrência de discordâncias nos contornos é de 91,7%, nas interseções entre os contornos é de 5,6% e apenas 2,7% dentro dos grãos [WOO et al., 2016].

Além das discordâncias associadas ao crescimento dos cristais, outras são geradas devido à tensões térmicas geradas por: expansão térmica anisotrópica do silício, restrições expansão impostas pelo cadinho e expansão térmica desigual de inclusões como SiC e Si₃N₄ na matriz de silício. As discordâncias também podem ser geradas por vacâncias e impurezas intersticiais ou por discordâncias pré-existentes no próprio material precursor (*seed*) da solidificação direcional [TSOUTSOUVA et al., 2021].

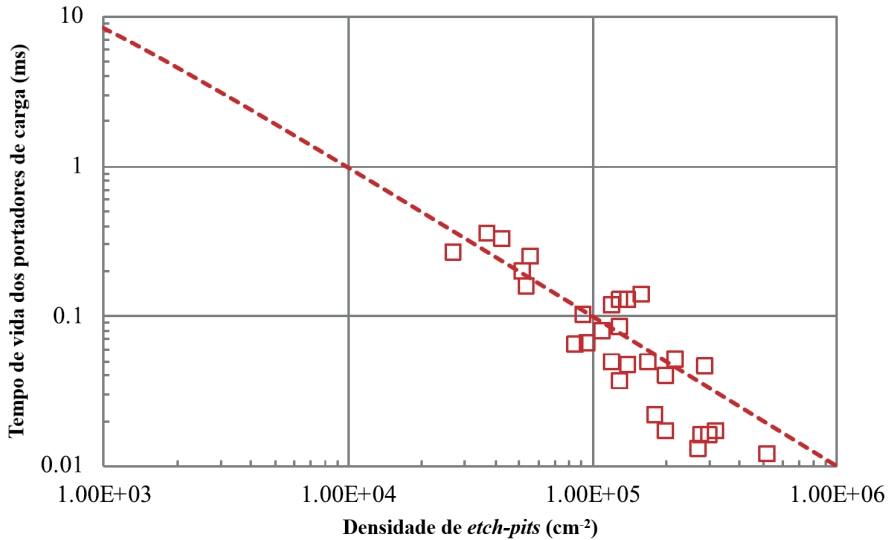
A alta densidade de discordâncias é considerada o principal impasse para atingir eficiências maiores em células de silício policristalino [YAMAGUCHI et al., 2018]. Na Figura 4 mostra resultados de mudanças no tempo de vida dos portadores de carga minoritária (elétrons) em função da densidade de regiões com acúmulo de discordâncias (*etch-pits*). O aumento da densidade de discordâncias N_d reduz o tempo de vida efetivo (τ_{eff}) de acordo com a equação (1), em que B é a probabilidade de recombinação radiativa ($2 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 / \text{s}$ para o silício) e N é a concentração de portadores de carga,

$$1/\tau_{\text{eff}} [\text{s}^{-1}] = BN + 0,1 \times N_d [\text{cm}^{-2}]. \quad (1)$$

Além disso, as discordâncias geralmente apresentam impurezas metálicas e dificultam a remoção dessas impurezas durante o processamento de *wafers* de poli-Si. Discordâncias que se estendem da superfície inferior a superfície superior da célula podem atuar como um caminho de desvio que aumenta a corrente de fuga e diminui a tensão de circuito aberto da célula.

Por conta das diferenças de orientações cristalográficas de diferentes grãos, cada um com um modulo de elasticidade diferente ao longo

Figura 4. Mudanças no tempo de vida de portadores de carga no silício policristalino em função da densidade de *etch-pits* de discordâncias.



Fonte: Adaptado de [YAMAGUCHI et al., 2018].

de diferentes direções, as respostas de cada grão às tensões térmicas serão diferentes, explicando a razão de distribuições não homogêneas de discordâncias nos lingotes de poli-Si [CHEN et al., 2010]. Tanto a quantidade quanto a distribuição de discordâncias influenciam no desempenho da célula fotovoltaica, uma distribuição não homogênea de discordâncias causa uma distribuição não homogênea do tempo de vida dos portadores de carga, o que resulta em eficiências mais baixas em comparação com outra célula com a mesma quantidade de discordâncias distribuídas homogeneamente [LIU et al., 2015].

3.3 Impurezas

A maioria das impurezas atua como centro de recombinação dos portadores de carga, reduzindo a eficiência do silício. Impurezas de ferro são as mais comuns no silício policristalino devido a sua alta solubilidade e difusividade,

por conta disso são considerados um dos principais defeitos limitantes do tempo de vida dos portadores de carga [HOFSTETTER et al., 2014].

Outra impureza comum no poli-si é o oxigênio, que precipita durante a solidificação do silício e atua como doador de elétrons, contribuindo para a recombinação precoce de lacunas ao se ligar com o boro presente no silício tipo-p (carregado positivamente) [LIU et al., 2015]. As ligações O-B e os precipitados de SiO_2 podem gerar ligações químicas pendentes de átomos de Si, que também atuam como centro ativo de recombinação. Regiões do fundo dos lingotes apresentam concentrações maiores de oxigênio [DURAIRA] et al., 2022].

O hidrogênio pode ser incorporado em células solares para preencher as ligações pendentes com os átomos de silício, reduzindo seu impacto na recombinação [MARTINS, 2016]. Técnicas de passivação de hidrogênio são efetivas em reduzir a recombinação, mas não é efetiva em todos os defeitos. Um exemplo disso são contornos de grão CSL com índice $\Sigma 27$, que permanecem eletricamente ativos após serem submetidos ao mesmo processo que possibilitou reduzir a atividade recombinativa de contornos de grão de ângulos aleatórios [TWEDDLE et al., 20221].

O carbono não é uma impureza comum no poli-Si e não é eletricamente ativo por se comportar de forma substitucional na matriz de Si quando em baixas concentrações, mas altas concentrações de C podem induzir defeitos nos *wafers* [LIU & MACDONALD, 2014]. Altos teores de carbono são encontrados nas regiões do topo dos lingotes, que as vezes são descartadas devido a alta concentração de impurezas [DURAIRA] et al., 2022].

4 Caracterização de defeitos no silício policristalino

4.1 Microscopia

Técnicas de microscopia são as mais utilizadas para caracterização microestrutural de silício policristalino, dentre elas, a microscopia ótica é técnica mais comum para observação tanto contornos de grãos quanto os *etch pits* de discordâncias é a microscopia ótica, que é muito utilizada por ser simples em relação à outras formas de microscopia. Em um microscópio ótico, um feixe de luz visível incide sobre a mostra e é refletida até o observador, passando por uma lente (ou conjunto de lentes) de aumento, permitindo observação com aumentos de até 1400 vezes. Com imagens de MO, a morfologia dos grãos e os dos *etch pits* de discordâncias, podem ser contabilizados com ferramentas comerciais como o *PVScan* [ADAMCZYK et al., 2018b]. Um

método desenvolvido por [FLECK & HAHN, 2020] também é capaz obter a densidade de discordâncias de forma automatizada em amostras com vários cm^2 a partir de imagens obtidas por MO.

Enquanto a microscopia ótica baseia-se na interação da luz com a amostra, a microscopia eletrônica aproveita os fenômenos de interação entre elétrons com a amostra para obter de informações mais detalhadas do material. A microscopia eletrônica de transmissão (MET) utiliza os elétrons que conseguem atravessar a amostra, caso ela seja suficientemente fina. Para o silício cristalino é mais comum a utilização de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em que o microscópio “varre” a superfície da amostra para detecção de elétrons que são refletidos ou espalhados após interagirem com a amostra. Com MEV é possível obter imagens com aumentos da ordem de até mais de 50.000 vezes (dependendo do microscópio), permitindo a visualização de defeitos cristalinos com mais detalhes em relação à microscopia ótica. MEV também é utilizada para obter informações referentes a orientação cristalográfica dos grãos e os contornos utilizando um sensor de EBSD (“*electron backscatter diffraction*”) acoplado ao microscópio. Outros ensaios como MET (microscopia eletrônica de transmissão), XRF (fluorescência de raios-X), FIB (“*focused ion beam*”) e EBIC (“*electron-beam-induced current*”) também são utilizadas para obter informações complementares, mas são menos comuns [WOO et al., 2016].

4.2 Decaimento de Fotocondutância

Um dos parâmetros mais úteis e acessíveis para a caracterização elétrica do silício é o tempo de vida dos portadores de carga, que é quanto tempo demora para um elétron se recombinar com uma lacuna após sua excitação [DASILVA-VILLANUEVA et al., 2022].

O tempo de vida dos portadores de carga pode ser obtido para diferentes regiões de um de silício obtido pelo ensaio de decaimento de fotocondutância (tradução livre de *photoconductance decay*). Um esquema desse ensaio é mostrado na Figura 5. A amostra é excitada por uma fonte de luz para a geração de elétrons e lacunas que vão se recombinar depois que a fonte de luz for desligada. O resultado desse ensaio é um mapa de fotocondutância, em que é possível ver a distribuição do tempo de vida em toda área da amostra analisada. Regiões com tempo de vida muito baixo podem indicar a presença de defeitos no *wafer* de silício, que contribuem para a recombinação precoce dos portadores de carga [SILVA, 2020].

Figura 5. Esquema de teste de Decaimento de Fotocondutância.

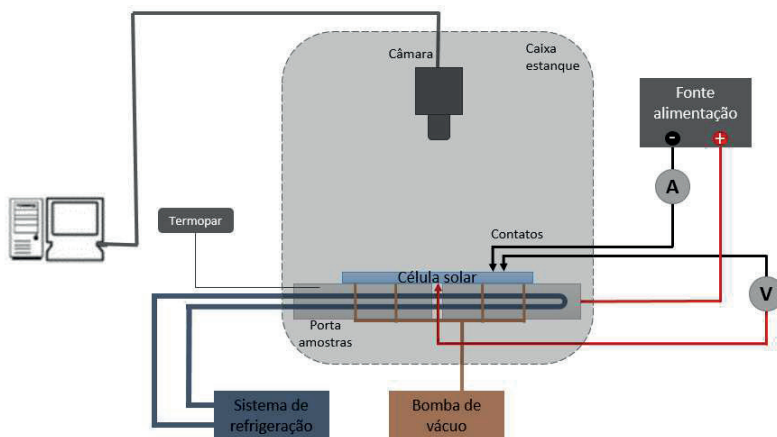


Fonte: [SILVA, 2020].

4.3 Eletroluminescência

A eletroluminescência (EL) é uma técnica utilizada para detecção de defeitos extrínsecos em células solares, como trincas ou para observação de defeitos intrínsecos, como contornos de grão. O princípio de funcionamento dessa técnica é o mesmo de diodos emissores de luz (LEDs): a célula é submetida a uma tensão e a passagem de corrente na sua junção $p-n$ provoca a recombinação dos pares de elétrons e lacunas no silício e, conseqüentemente, a emissão de luz pela célula. Nas regiões com defeitos, a recombinação é do tipo Shockley-Read-Hall, havendo pouca emissão radiativa em relação às regiões sem defeitos, nas quais ocorre recombinação radiativa [DHIMISH & HOLMES, 2019].

Um diagrama de um sistema de eletroluminescência é mostrado na Figura 6. Nesse exemplo, a célula é posicionada em uma base e fixada por sucção e resfriada para manter a temperatura da amostra constante ao longo do ensaio. Os eletrodos da célula são ligados a uma fonte de alimentação. Para a detecção das imagens podem ser utilizados sensores de silício ou de arseneto de gálio ou uma câmera convencional sem filtro de infravermelho (IV), pois a radiação emitida por uma célula de silício está na região do IV (entre 1000 e 1200 nm), não sendo detectável à olho nu [FRAZÃO et al., 2017]. Para evitar interferência de luz externa, o ensaio deve ocorrer dentro de uma caixa escura, contendo apenas aberturas para as conexões da fonte, sistema de resfriamento e câmera.

Figura 6. Estrutura química da ciprofloxacina.

Fonte: Autores (2024).

5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma visão geral sobre células fotovoltaicas de silício policristalino, detalhando sua estrutura básica, princípio de funcionamento e os defeitos microestruturais mais comuns, como contornos de grãos e discordâncias. Esses defeitos têm impacto direto na eficiência das células, e a compreensão de suas características é essencial para o avanço das tecnologias de energia solar.

A análise dos defeitos em células de silício policristalino revelou que contornos de grãos e discordâncias são os principais fatores que contribuem para a redução da eficiência. Esses defeitos interferem na movimentação dos portadores de carga, aumentando a taxa de recombinação e, conseqüentemente, limitando a produção de energia elétrica. No entanto, o uso de técnicas de caracterização, como microscopia, ensaios de decaimento de fotocondutância e eletroluminescência, oferece meios eficazes para identificar e mitigar esses defeitos.

O avanço dessas tecnologias de caracterização permite relacionar de forma precisa a presença e a distribuição dos defeitos com a eficiência final das células fotovoltaicas. Tais inovações são fundamentais para a otimização do desempenho das células solares, tornando-as mais competitivas e acessíveis no mercado. Além disso, a contínua investigação sobre métodos de

redução de defeitos microestruturais contribuirá para a fabricação de células fotovoltaicas mais eficientes e sustentáveis, alinhando-se com a crescente demanda por fontes de energia renováveis e limpas.

À medida que a indústria solar se expande, o conhecimento detalhado sobre os mecanismos de degradação e a aplicação de métodos avançados de análise são essenciais para impulsionar o desenvolvimento de tecnologias fotovoltaicas de próxima geração. A busca por melhorias na eficiência das células de silício policristalino reforça a importância de pesquisas contínuas, promovendo a inovação no setor de energias renováveis e contribuindo para um futuro energético mais sustentável.

Referências Bibliográficas

- [ADAMCZYK et al., 2018a] ADAMCZYK, K.; SØNDENÅ, R.; STOKKAN, G.; LOONEY, E.; JENSEN, M.; LAI, B.; RINIO, M.; SABATINO, M. D. Recombination activity of grain boundaries in high-performance multicrystalline Si during solar cell processing. *Journal of Applied Physics*, v. 123, n. 5, p. 055705, 02 2018. ISSN 0021-8979. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.5018797>.
- [ADAMCZYK et al., 2018b] ADAMCZYK, K.; STOKKAN, G.; SABATINO, M. D. Guidelines for establishing an etching procedure for dislocation density measurements on multicrystalline silicon samples. *MethodsX*, v. 5, pp. 1178–1186, 2018. ISSN 2215-0161. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016118301559>.
- [AGHAEI et al., 2022] AGHAEI, M.; FAIRBROTHER, A.; GOK, A.; AHMAD, S.; KAZIM, S.; LOBATO, K.; ORESKI, G.; REINDERS, A.; SCHMITZ, J.; THEELEN, M.; YILMAZ, P.; KETTLE, J. Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 159, p. 112160, 2022. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122000880>.
- [ALAAEDDIN et al., 2019] ALAAEDDIN, M.; SAPUAN, S.; ZUHRI, M.; ZAINUDIN, E.; AL-OQLA, F. M. Photovoltaic applications: Status and manufacturing prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 102, pp. 318–332, 2019. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118308219>.

- [ARAFUNE et al., 2006] ARAFUNE, K.; SASAKI, T.; WAKABAYASHI, F.; TERADA, Y.; OHSHITA, Y.; YAMAGUCHI, M. Study on defects and impurities in cast-grown polycrystalline silicon substrates for solar cells. *Physica B: Condensed Matter*, Elsevier, v. 376, pp. 236–239, 2006.
- [CHEN et al., 2010] CHEN, N.; QIU, S.; LIU, B.; DU, G.; LIU, G.; SUN, W. An optical microscopy study of dislocations in multicrystalline silicon grown by directional solidification method. *Materials Science in Semiconductor Processing*, v. 13, n. 4, pp. 276–280, 2010. ISSN 1369-8001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136980011000096X>.
- [DASILVA-VILLANUEVA et al., 2022] DASILVA-VILLANUEVA, N.; CATALÁN-GÓMEZ, S.; FUERTES MARRÓN, D.; TORRES, J.; GARCÍA-CORPAS, M.; DEL CAÑIZO, C. Reduction of trapping and recombination in upgraded metallurgical grade silicon: Impact of phosphorous diffusion gettering. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 234, p. 111410, 2022. ISSN 0927-0248. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024821004529>.
- [DHIMISH & HOLMES, 2019] DHIMISH, M.; HOLMES, V. Solar cells micro crack detection technique using state-of-the-art electroluminescence imaging. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, v. 4, n. 4, pp. 499–508, 2019. ISSN 2468-2179. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468217919302345>.
- [DURAIRAJ et al., 2022] DURAIRAJ, S.; KESAVAN, V.; KEERTHIVASAN, T.; Avinash Kumar, M.; SRINIVASAN, M.; RAMASAMY, P. Investigation of orientation, surface morphology, impurity concentration and reflectivity of the multi-crystalline silicon wafers. *Materials Chemistry and Physics*, v. 282, p. 125932, 2022. ISSN 0254-0584. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254058422002383>.
- [FLECK & HAHN, 2020] FLECK, M.; HAHN, G. Automatic etch pit density analysis in multicrystalline silicon. *Computational Materials Science*, v. 183, p. 109886, 2020. ISSN 0927-0256. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927025620303737>.
- [FRAZÃO et al., 2017] FRAZÃO, M.; SILVA, J.; LOBATO, K.; SERRA, J. Electroluminescence of silicon solar cells using a consumer grade

- digital camera. *Measurement*, v. 99, pp. 7–12, 2017. ISSN 0263-2241. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224116307187>.
- [FRAZÃO, 2016] FRAZÃO, M. S. Eletroluminescência de células solares. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.
- [GREEN, 2002] GREEN, M. A. Photovoltaic principles. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Elsevier, v. 14, n. 1-2, pp. 11–17, 2002.
- [HOFSTETTER et al., 2014] HOFSTETTER, J.; FENNING, D. P.; POWELL, D. M.; MORISHIGE, A. E.; BUONASSISI, T. Iron management in multicrystalline silicon through predictive simulation: point defects, precipitates, and structural defect interactions. In: MURPHY, J. (Ed.). *GETTERING AND DEFECT ENGINEERING IN SEMICONDUCTOR TECHNOLOGY XV*. [S.l.], 2014. (Solid State Phenomena, v. 205-206), pp. 15–25. ISSN 1012-0394.
- [KIM et al., 2021] KIM, S.; HOANG, V. Q.; BARK, C. W. Silicon-based technologies for flexible photovoltaic (pv) devices: From basic mechanism to manufacturing technologies. *Nanomaterials*, v. 11, n. 11, 2021. ISSN 2079-4991. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-4991/11/11/2944>.
- [KRISTENSEN, 2020] KRISTENSEN, S. T. Temperature coefficients and crystal defects in multicrystalline silicon solar cells. 216 p. Tese (Philosophiae Doctor in Renewable Energy) – University of Agder, 2020.
- [LIU et al., 2015] LIU, X.; YAN, G.; HONG, R. Generation mechanism of inhomogeneous minority carrier lifetime distribution in high quality mc-si wafers and the impacts on electrical performance of wafers and solar cells. *Journal of Materials Science & Technology*, v. 31, n. 11, pp. 1094–1100, 2015. ISSN 1005-0302. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1005030215001206>.
- [LIU & MACDONALD, 2014] LIU, A. Y.; MACDONALD, D. Precipitation of iron in multicrystalline silicon during annealing. *Journal of Applied Physics*, v. 115, 2014. ISSN 00218979.
- [MARTINS, 2016] MARTINS, G. *Impurity and defect mitigation for silicon photovoltaics*. Tese (Doutorado) – University of Oxford, 2016.

- [MITAMURA et al., 2020] MITAMURA, K.; KUTSUKAKE, K.; KOJIMA, T.; USAMI, N. Determination of carrier recombination velocity at inclined grain boundaries in multicrystalline silicon through photoluminescence imaging and carrier simulation. *Journal of Applied Physics*, v. 128, n. 12, p. 125103, 09 2020. ISSN 0021-8979. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/5.0017823>.
- [OGBOMO et al., 2017] OGBOMO, O. O.; AMALU, E. H.; EKERE, N.; OLAGBEGI, P. A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 75, pp. 1225–1238, 2017. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116308152>.
- [SAGA, 2010] SAGA, T. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. *npg asia materials*, Nature Publishing Group, v. 2, n. 3, pp. 96–102, 2010.
- [SAMADI et al., 2022] SAMADI, A.; CIESLA, A.; CHAN, C.; JUHL, M. Implications of grain boundaries on quasi-steady-state photoconductance measurements in multicrystalline and cast-mono silicon. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 238, p. 111639, 2022. ISSN 0927-0248. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024822000617>.
- [SILVA, 2020] SILVA, C. A. *Análise Microestrutural de Silício Policristalino Utilizado em Células Fotovoltaicas*. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) – Instituto Federal do Ceará, Ceará, 2020.
- [TREMPA et al., 2017] TREMPA, M.; KUPKA, I.; KRANERT, C.; LEHMANN, T.; REIMANN, C.; FRIEDRICH, J. Evolution of grain structure and recombination active dislocations in extraordinary tall conventional and high performance multi-crystalline silicon ingots. *Journal of Crystal Growth*, v. 459, pp. 67–75, 2017. ISSN 0022-0248. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002202481630969X>.
- [TSOUTSOUVA et al., 2021] TSOUTSOUVA, M.; REGULA, G.; RYNINGEN, B.; VULLUM, P.; MANGELINCK-NOËL, N.; STOKKAN, G. Dynamic observation of dislocation evolution and interaction with twin boundaries in silicon crystal growth using in-situ synchrotron x-ray diffraction imaging. *Acta Materialia*, v. 210, p. 116819, 2021. ISSN 1359-6454. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645421001993>.

- [TWEDDLE et al., 20221] TWEDDLE, D.; HAMER, P.; SHEN, Z.; MARKEVICH, V. P.; MOODY, M. P.; WILSHAW, P. R. Direct observation of hydrogen at defects in multicrystalline silicon. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 29, n. 11, pp. 1158–1164, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.3184>.
- [VECCHI et al., 2021] VECCHI, P.; ARMAROLI, G.; DI SABATINO, M.; CAVALCOLI, D. Iron related precipitates in multicrystalline silicon by conductive atomic force microscopy. *Materials Science in Semiconductor Processing*, v. 129, p. 105789, 2021. ISSN 1369-8001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369800121001293>.
- [WANG et al., 2024] WANG, L.; LIU, J.; LI, Y.; WEI, G.; LI, Q.; FAN, Z.; LIU, H.; AN, Y.; LIU, C.; LI, J., et al. Dislocations in crystalline silicon solar cells. *Advanced Energy and Sustainability Research*, Wiley Online Library, v. 5, n. 2, p. 2300240, 2024.
- [WOO et al., 2016] WOO, S.; BERTONI, M.; CHOI, K.; NAM, S.; CASTELLANOS, S.; POWELL, D. M.; BUONASSISI, T.; CHOI, H. An insight into dislocation density reduction in multicrystalline silicon. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 155, pp. 88–100, 2016. ISSN 0927-0248. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024816300162>.
- [YAMAGUCHI et al., 2018] YAMAGUCHI, M.; LEE, K.-H.; ARAKI, K.; KOJIMA, N.; OHSHITA, Y. Analysis for efficiency potential of crystalline si solar cells. *Journal of Materials Research*, Cambridge University Press, v. 33, n. 17, pp. 2621–2626, 2018.

Aplicação de Robótica em Energias Renováveis

Daniela Cadore Vale¹ e Auzuir Ripardo de Alexandria²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE,
Campus de Maracanaú, Brasil

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE,
Campus de Fortaleza, Brasil

1 Introdução

Tendo como pilares a capacidade de se recriar na natureza, as fontes naturais que geram as energias renováveis (ER) vêm há alguns anos tornando-se foco de grande parte dos estudos científicos com o objetivo de potencializar e otimizar a produção de energia através de um equilíbrio natural consciente e sustentável.

As energias solar, eólica, hidráulica, maré motriz, entre outras, por terem um impacto ambiental significativamente menor que as demais, têm recebido um volume considerável de investimentos [VINE, 2008], principalmente em tecnologia. Além disso, os avanços tecnológicos na robótica, por trazerem novos horizontes aos métodos tradicionais da engenharia [BAÑOS et al., 2018], fazem com que se desperte o interesse de diversas áreas em seu estudo, como o da energia sustentável [IEA, 2014].

2 Utilização de softwares em otimização e *Problem Solver*

Uma importante utilização da robótica na área na melhoria das tecnologias de ER são os algoritmos de aprimoramento, que “constituem uma ferramenta adequada para resolver problemas complexos no âmbito de sistemas de energia renovável” [IEA, 2014]. Como a maioria dos recursos de energia renovável depende do clima, eles requerem métodos complexos de planejamento e otimização de controle, o que pode ser trabalhado com recursos computacionais. Muitos problemas envolvem variáveis, tais como justificar os padrões de alocação de recursos e serviços de energia, a formulação de políticas locais sobre consumo de energia, desenvolvimento econômico e estrutura de energia e análise de interações entre custo econômico, confiabilidade do sistema e energia, fornecimento de segurança, etc. [IEA, 2014]; e podem ser solucionados por meio técnicas como programação linear por intervalos (ILP), programação restrita ao acaso e programação linear inteira (MILP) que podem extrair a melhor relação entre os recursos de energia/serviço e planos de expansão de capacidade desejados com um custo minimizado do sistema, maximização da confiabilidade e máxima segurança na distribuição energética [BERNDT & WOOD, 1975].

Vários autores vem propondo algoritmos de otimização multi-objetivo [IEA, 2014] para planejamento em melhor caso, considerando tecnologias de várias fontes: energia fotovoltaica, turbina eólica, célula de combustível, micro turbina, turbina a gás, entre demais. [YAMAMOTO, 2016], por exemplo, propôs um método de otimização que integra programas de ILP, programação em dois estágios e programação baseada em inferioridade e inferioridade-estocástica para o gerenciamento de energias renováveis a longo prazo com o objetivo de gerar alternativas de decisão e, assim, ajudar a identificar as políticas desejadas sob várias restrições econômicas e de confiabilidade do sistema.

3 Inteligência Artificial em Energias Renováveis

Conforme a Agência Internacional de Energia (AIE) “As emissões de gases com efeito de estufa (GEE) relacionadas à energia levariam a uma degradação climática considerável com um aquecimento global de 6°C” [BERNDT & WOOD, 1975]. Consequentemente, a necessidade de melhoria do desempenho de fontes de energia alternativas é imprescindível para prover a energia futuramente demandada [LEI et al., 2009], daí a utilização das técnicas de inteligência artificial (IA) nesse âmbito. IA está presente

em praticamente todos os tipos de ER (eólica, solar, geotérmica, maré motriz, biológicas, híbridas, etc.) para o projeto, otimização, estimativa, gerenciamento, distribuição e política.

3.1 Inteligência Artificial em Energia Eólica

A pesquisa e o desenvolvimento proeminente na aplicação da IA na energia eólica contêm abordagens de três categorias principais: aprendizagem neural, estatística e evolutiva. A maior parte do trabalho de pesquisa se concentra na previsão da velocidade do vento e da energia eólica usando as abordagens de aprendizado de máquina. Uma breve revisão do modelo físico, modelo estatístico, modelo de correlação e modelos de redes neurais artificiais para velocidade do vento e estimativa de potência gerada foi apresentada por [LEI et al., 2009]. Já em outro estudo relacionado de [COLAK et al., 2009], abordou os procedimentos de mineração de dados para estimativa de geração de energia eólica em quatro categorias de tempo (muito curto, curto, médio e longo prazo).

3.2 Inteligência Artificial em Energia Solar

Particularmente, as aplicações detalhadas dos métodos Redes Neurais Artificiais na modelagem e design, aquecimento do edifício, etc., são resumidas em [CAI et al., 2009a]. [MELLITA & KALOGIROU, 2008] informam a pesquisa de detalhes com base na aplicação de IA na modelagem de dados meteorológicos, dimensionamento, modelagem, simulação e controle de sistemas fotovoltaicos. [MELLITA et al., 2009] também analisaram os usos das técnicas de IA no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos individuais e conectados à rede. A estimativa do consumo de energia do edifício usando métodos estatísticos e de IA foi compilada em [PARDALOS & RESENDE, 2002]. A radiação solar global (GSR) está prevista com um tipo de rede neural denominada “backpropagation” (BPNN), usando temperatura e umidade como insumos ao longo dos anos (1998-2002) [REHMAN & MOHANDÉS, 2008]. Esta foi estimada usando o BPNN, analisando os dados de onze estações diferentes.

3.3 Inteligência Artificial em Energia Geotérmica

Os enfoques de IA foram utilizados em aplicações geotérmicas, que estão esclarecidos em [SATRAPE, 1987]. Em particular, o seu uso

consiste em aproximar sensores e robôs de perfurações de poços geotérmicos, desta forma, informações sobre design, controle e otimização são explicados em [SATRAPE, 1987]. Já o efeito do progresso proporcionado por tal melhoria é elucidado em [PRUESS, 1990]. Ainda que o método de Redes Neurais Artificiais seja usado na maioria dos estudos [BASSAM et al., 2010]. [ARSLAN, 2011] utilizaram a rede neural “backpropagation” com Levenberg-Marguardt (LM); com Pola-Ribiere, algoritmo de gradiente conjugado (CGP) e gradiente conjugado escalado (SCG), auxiliando na previsão de desempenho do calor vertical. Bassam et al. [ARSLAN, 2011] usaram a BPNN baseada em LM para a formação estática Previsão de temperatura (SFT) do poço geotérmico, sendo, também, utilizado para determinar a melhor condição de funcionamento de um poço geotérmico. Bem como, na geração de mapas geotérmicos em variadas profundidades apresentando resultados com menos de 5% de desvio dos valores reais [CAI et al., 2009b].

4 Robótica no Aproveitamento Eficiente da Energia do Fluxo De Maré

Em virtude do aquecimento global e da poluição, que vem ameaçando, progressivamente, o ambiente em que vivemos, a geração de energias limpas e renováveis acaba também por ser prejudicada, ainda que existam diferentes tipos de energias que possam ser aproveitados, como a energia das marés marinhas. Todavia, devido ao ambiente agressivo e aos mecanismos atuais utilizados para aproveitar os fluxos das marés – que estão sujeitos às incrustações de algas marinhas, à corrosão e aos emaranhamentos –, esse trabalho acaba se tornando hostil.

Com o objetivo de aproveitar, eficazmente, a energia promovida pelo fluxo das marés de forma mais econômica, foi desenvolvido um mecanismo naturalmente resistente aos desafios apresentados pelo meio. Consiste em um simples mecanismo baseado na tecnologia de cauda de peixe robótico, utilizando o fenômeno físico da oscilação, em que as correntes de água que circulam em torno de um corpo produzem o movimento transversal.

Existem dois tipos de osciladores: o primeiro, um oscilador tipo asa; o segundo, um oscilador tipo cabeça. Para escolher a suavidade adequada do material destinado ao primeiro tipo de oscilador, utiliza-se uma ferramenta de análise numérica, a saber, ANSYS. Já para escolher a melhor forma do segundo tipo, analisa-se os coeficientes de elevação.

O Japão, após muitos desastres naturais, passou a investir em energias limpas e renováveis, dentre elas, a energia maré motriz. Sabendo disso, foi proposto um gerador de corrente marítima do tipo oscilatório baseado na tecnologia dos peixes robóticos, em que a barbatana é produzida a partir de módulos elásticos de mudança variável da asa oscilante flexível [YAMAMOTO, 1995]. O autor descobriu que a barbatana tinha um potencial de gerador de corrente de maré do tipo oscilatório, mesmo que os custos de manutenção sejam altos.

Existem muitos estudos sobre as abordagens fundamentais da geração de energia marinha, dentre eles é o sistema VIVACE da Universidade de Michigan [ABIRU & YOSHITAKE, 2012], esse sistema utiliza o fenômeno físico de vórtice, em que corrente marítima circula em torno de cilindros e induzem movimentos transversais, a energia cinética resultante é transformada em eletricidade. Existe um gerador alternativo, que utiliza o tipo de vibração de asa e um fluxo de água, feito por Abiru em Fukuoka Industrial Universidade [HEIJIMA & HIYOSHI, 2010]. Outro tipo de gerador, que utiliza o princípio de oscilação de pêndulo, foi desenvolvido na Universidade de Okayama [HEIJIMA & NAKANO, 2012]. O objetivo dos autores é fornecer alguma ajuda para o desenvolvimento de uma solução mais eficiente.

5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma análise abrangente da aplicação da robótica no contexto das energias renováveis, destacando a integração de tecnologias como a Inteligência Artificial (IA) e algoritmos de otimização na busca por soluções inovadoras. A partir da revisão bibliográfica, ficou claro que as tecnologias robóticas desempenham um papel crucial no avanço de fontes de energia limpa, como solar, eólica e geotérmica, contribuindo para a sustentabilidade e a eficiência desses sistemas.

As técnicas de IA e otimização são fundamentais para enfrentar os desafios complexos impostos pelo uso de fontes renováveis, como a variabilidade e a intermitência das condições climáticas. A robótica permite a implementação de sistemas de monitoramento e controle que otimizam a produção e a distribuição de energia, facilitando a tomada de decisões em tempo real e garantindo uma maior resiliência e eficiência dos sistemas energéticos.

O estudo também revelou uma diversidade de abordagens inovadoras em cada fonte de energia renovável. Na energia eólica, as redes neurais e os modelos de aprendizado de máquina são amplamente utilizados para prever padrões de vento e otimizar a geração de energia. No campo da energia solar, as técnicas de IA aprimoram o design e a modelagem de sistemas fotovoltaicos, enquanto, na energia geotérmica, a robótica facilita o acesso e o controle em ambientes de difícil acesso, maximizando a exploração desses recursos de forma sustentável.

Embora os avanços sejam promissores, ainda há um vasto campo para exploração. Investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento são essenciais para a implementação mais ampla e eficiente dessas tecnologias, especialmente à medida que novas fontes de energia renovável são exploradas. As futuras pesquisas devem se concentrar na integração e na adequação das técnicas inovadoras, visando não apenas a otimização do desempenho das fontes de energia, mas também a prosperidade sustentável em escala global.

Este panorama reafirma o papel vital que a robótica e as tecnologias avançadas desempenham no aprimoramento das energias renováveis, sendo fundamental para construir um futuro energético mais sustentável e resiliente.

Referências Bibliográficas

- [ABIRU & YOSHITAKE, 2012] ABIRU, H.; YOSHITAKE, A. Experimental study on a cascade flapping wing hydroelectric power generator. *Journal of Energy and Power Engineering*, v. 6, pp. 1429–1436, 2012.
- [ALMURIB, 2018] ALMURIB, H. A.; AL-QRIMLI, H. F.; KUMAR, N. A review of application industrial robotic design. In: *Proceedings of the 9th International Conference*. [S.l.: s.n.], 2018.
- [ARSLAN, 2011] ARSLAN, O. Power generation from medium temperature geothermal resources: ann-based optimization of kalina cycle system-34. *Energy*, v. 36, pp. 2528–2534, 2011.
- [BAÑOS et al., 2018] BAÑOS, R.; MANZANO-AGUGLIARO, F.; MONTOYA, F. G.; GIL, C.; ALCAYDE, A.; GÓMEZ, J. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy*, v. 1, 2010.

- [BASSAM et al., 2010] BASSAM, A.; SANTOYO, E.; ANDAVERDE, J.; HERNÁNDEZ, J. A.; ESPINOZA-OJEDA, O. M. Estimation of static formation temperatures in geothermal wells by using an artificial neural network approach. *Computers & Geosciences*, v. 36, pp. 1191–1199, 2010.
- [BERNDT & WOOD, 1975] BERNDT, E. R.; WOOD, D. O. Technology prices and derived demand for energy. *Review of Economics and Statistics*, v. 57, pp. 259–268, 1975.
- [CAI et al., 2009a] CAI, Y. P.; HUANG, G. H.; YANG, Z. F.; LIN, Q. G.; TAN, Q. Community-scale renewable energy systems planning under uncertainty-an interval chance-constrained programming approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 4, pp. 721–735, 2009.
- [CAI et al., 2009b] CAI, Y. P.; HUANG, G. H.; TAN, Q.; YANG, Z. F. Planning of community-scale renewable energy management systems in a mixed stochastic and fuzzy environment. *Renewable Energy*, v. 34, n. 7, pp. 1833–1847, 2009.
- [COLAK et al., 2009] COLAK, I.; SAGIROGLU, S.; YESILBUDAK, M. Data mining and wind power prediction: a literature review. *Renewable Energy*, v. 46, pp. 241–247, 2012.
- [HEIJIMA & HIYOSHI, 2010] HEIJIMA, S.; HIYOSHI, Y. Vibrational amplification technique for power generation using wind-induced vibration. *Wind Energy*, v. 34, pp. 135–141, 2010.
- [HEIJIMA & NAKANO, 2012] HEIJIMA, S.; NAKANO, S. Experimental study on control parameters for aerodynamic vibration-based power generation using feedback amplification. *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, v. 68, pp. 88–97, 2012.
- [IEA, 2014] International Energy Agency (IEA). *Technology road map solar photovoltaic energy*. 2014. pp. 1–60.
- [LEI et al., 2009] LEI, M.; SHIYAN, L.; CHUANWEN, J.; HONGLING, L.; YAN, Z. A review on the forecasting of wind speed and generated power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 4, pp. 915–920, 2009.
- [MELLITA et al., 2009] MELLITA, A.; KALOGIROU, S. A.; HONTORIA, L.; SHAARID, S. Artificial intelligence techniques for sizing photovoltaic

- systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 2, pp. 406–419, 2009.
- [MELLITA & KALOGIROU, 2008] MELLITA, A.; KALOGIROU, S. A. Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: a review. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 34, n. 5, pp. 574–632, 2008.
- [PARDALOS & RESENDE, 2002] PARDALOS, P. M.; RESENDE, M. G. C. *Handbook of applied optimization*. [S.l.]: Oxford University Press, 2002.
- [REHMAN & MOHANDES, 2008] REHMAN, S.; MOHANDES, M. Artificial neural network estimation of global solar radiation using air temperature and relative humidity. *Energy Policy*, v. 36, n. 2, pp. 571–576, 2008.
- [SATRAPE, 1987] SATRAPE, J. V. *Potential impacts of artificial intelligence expert systems on geothermal well drilling costs*. [S.l.], 1987. ACO3-86SF16299.
- [PRUESS, 1990] PRUESS, K. Modeling of geothermal reservoirs: fundamental processes, computer simulation and field applications. *Geothermics*, v. 19, n. 1, pp. 3–15, 1990.
- [SANYAL et al., 2000] SANYAL, S. K.; BUTLER, S. J.; SWENSON, D.; HARDEMAN, B. Review of the state-of-the-art of numerical simulation of enhanced geothermal systems. In: *Proceedings WGC Japan*. [S.l.: s.n.], 2000. pp. 3853–3858.
- [VINE, 2008] VINE, E. Breaking down the silos: the integration of energy efficiency, renewable energy, demand response and climate change. *Energy Efficiency*, v. 1, pp. 49–63, 2008.
- [YAMAMOTO, 2016] YAMAMOTO, I. *Practical Robotics and Mechatronics: Marine, Space and Medical Applications*. Croydon, UK: IET, 2016. pp. 1–192.
- [YAMAMOTO, 1995] YAMAMOTO, I. Propulsion system with flexible/rigid oscillating fin. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 20, pp. 23–30, 1995.

Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal de Pequeno Porte: Estudos Aerodinâmicos

Izamaro de Araújo¹ e Francisco Frederico dos Santos Matos²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE,
Campus de Jaguaribe, Brasil

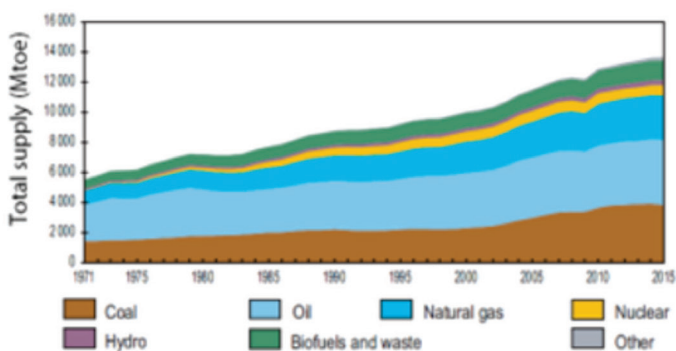
²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE,
Campus de Maracanaú, Brasil

1 Introdução

No século passado, a oferta de energia vinda dos combustíveis fósseis deu suporte ao crescimento e às transformações mundiais. Neste século, o cenário se desenha diferente ao se deparar com a necessidade do desenvolvimento sustentável. Isso se faz necessário para manter a disponibilidade energética compatível com o acentuado aumento do consumo provocado pelo novo ciclo econômico [ANEEL, 2008].

Embora seja necessário aumentar a oferta energética e que este aumento deva estar pautado na sustentabilidade, os indicativos da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* – IEA) mostram que os combustíveis fósseis predominam a oferta de energia [IEA, 2017]. É certo, porém, que as fontes alternativas vêm aumentando sua representatividade dentro da matriz energética mundial, passando de 0,1% em 1973 a 1,5% em 2015. No entanto, a participação dessas fontes ainda é considerada modesta quando comparada aos combustíveis fósseis, que juntos representam 81,4% dos recursos energéticos disponíveis, segundo a IEA. A Figura 1 apresenta a evolução da matriz de oferta mundial de energia primária de 1971 a 2015.

Figura 1. Fornecimento de energia primária total no mundo.



Fonte: [IEA, 2017].

Os recursos energéticos primários podem ser consumidos diretamente ou podem sofrer transformações para serem utilizados. Dentre os meios de transformação destaca-se a eletricidade, pelo papel fundamental que ocupa no atual patamar de desenvolvimento e por ser indispensável para o crescimento sustentável. Para ilustrar a IEA mostra que o consumo de eletricidade representa hoje 18,1% do consumo total de energia, sendo que sua produção aumentou em quase quatro vezes nos últimos 46 anos [IEA, 2017].

Para a produção de eletricidade, várias fontes de energia primária podem ser utilizadas, sejam renováveis ou não-renováveis. No entanto, são os combustíveis fósseis, fontes não-renováveis, que exercem profundo domínio na produção de eletricidade, perfazendo hoje 66,3% da matriz mundial enquanto que apenas 7,1% são oriundos de fontes alternativas, como mostra a IEA.

Diante deste cenário, o setor de energia elétrica ingressa no século XXI buscando expandir a oferta com o consumo consciente, a preservação do meio ambiente e melhoria da qualidade de vida [ANEEL, 2008]. Seu desenvolvimento deve ser capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades futuras. Nesse sentido, a maneira mais segura de expandir a oferta de energia elétrica é através do uso das energias renováveis, principalmente de fontes alternativas como a solar e a eólica.

As fontes renováveis têm tido crescimento acelerado dentro da matriz de geração de eletricidade, principalmente a partir do início deste século. Esse crescimento foi possível a partir das políticas públicas e também a partir do aprimoramento das pesquisas, do conhecimento tecnológico, do desenvolvimento de materiais e de processos produtivos, entre outros. A matriz de produção de eletricidade brasileira é considerada bastante limpa, onde cerca 82% é proveniente de fontes renováveis [MME, 2017], quando comparada a matriz mundial que conta com apenas 23,1% oriundas dessas fontes [IEA, 2017].

Na perspectiva de utilização de fontes alternativas para produção de eletricidade, a energia eólica tem apresentado singular destaque pelo papel que vem desempenhando no setor energético mundial. Para ilustrar, um incremento anual na média de 25% vem sendo mantido nos últimos vinte anos [GWEC, 2016]. Seguindo a mesma linha, o Brasil vem buscando aumentar a utilização da energia eólica, apresentando incremento anual médio próximo à 50% nos últimos dez anos, ficando assim entre os dez maiores produtores no mundo [BP, 2017]. Segundo o Ministério de Minas e Energia – MME, hoje cerca de 5,4% de toda eletricidade produzida no país vem da energia eólica, o que chega a 33,5 TWh de energia produzida no último ano avaliado. Estima-se, somente considerando determinadas condições para instalações de grandes turbinas eólicas, que o país tem um potencial de geração de eletricidade na ordem de 272,2 TWh/ano, sendo mais da metade encontrado somente na região nordeste [MME, 2017].

Embora a exploração do potencial eólico brasileiro tem se voltado fortemente para a instalação de grandes parques eólicos, há possibilidade ainda de produção através da micro e mini geração, em sistemas isolados ou não. Nesse sentido, a micro e mini geração distribuída “[...] vem sendo incentivada por recentes ações regulatórias, tais como a que estabelece a possibilidade de compensação da energia excedente produzida por sistemas de menor porte” [MME, 2016a]. A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, mostra que a geração distribuída tem se concentrado em sua maior parte pelo aproveitamento da energia do sol, onde 18.476 unidades geradoras totalizam uma capacidade instalada de 154.160,66 kW, enquanto a geração eólica possui apenas 53 unidades com total instalado de 10.285,60 kW no Brasil [ENEEL, 2017].

Apesar da pouca representação na matriz de geração de eletricidade nacional, a micro e minigeração distribuída traz uma boa perspectiva no aproveitamento de energias alternativas ao passo que contribui para a diminuição das perdas por transmissão, que hoje atinge 16,1% de

toda a energia produzida, segundo o MME [MME, 2017]. Dessa forma, pesquisas que visem o desenvolvimento de equipamentos eólicos que melhor aproveitem a energia dos ventos em locais compatíveis com a micro ou minigeração distribuída se faz necessário.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo trazer uma visão geral das publicações que tratam sobre os estudos aerodinâmicos de turbinas eólicas de eixo horizontal de pequeno porte, dividido em três seções principais. A primeira seção enfoca no desenvolvimento histórico e a atual situação da energia eólica no Brasil. A segunda seção traz um levantamento das possibilidades de estudos no desenvolvimento de turbinas eólicas de eixo horizontal. A terceira seção busca sistematizar os trabalhos realizados sobre o desenvolvimento aerodinâmico de turbinas eólicas de eixo horizontal de pequeno porte.

2 Desenvolvimento e atual situação da energia eólica no Brasil

2.1 O estudo do potencial eólico brasileiro

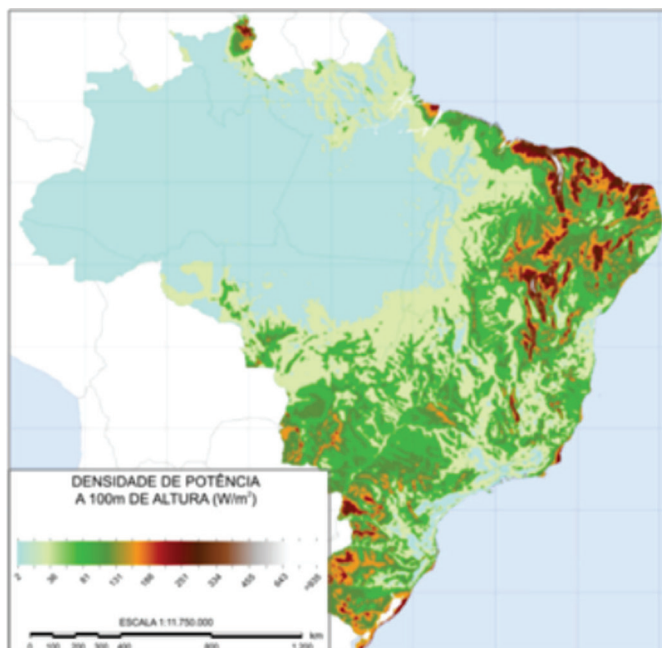
Segundo o Ministério de Minas e Energia, para o fortalecimento do setor eólico no Brasil, é de fundamental importância a consolidação de dados meteorológicos consistentes e confiáveis [MME, 2017]. Esse conhecimento é objeto de estudos e inventários desde a década de 70 no país, sendo revelado de forma lenta, mas progressiva. Em 1976-77, um dos primeiros estudos dessa natureza foi realizado pelo Instituto de Atividades Espaciais, através do processamento de dados anemométricos de aeroportos brasileiros, apontando a viabilidade para aplicações de equipamentos de pequeno porte isolados e como sítios promissores para exploração da energia eólica o Litoral do Nordeste e Arquipélago de Fernando de Noronha. Em 1987, a Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF concluiu um inventário do potencial eólico da região Nordeste, através de dados anemográficos de estações a 10 m de altura. A Eletrobras elaborou o primeiro “Atlas Preliminar do Potencial Eólico Nacional” em 1979, culminando, através da continuidade dos estudos, no “Atlas do Potencial Eólico Nacional”. Este atlas apontava que o litoral brasileiro e áreas do interior favorecidas por relevo e baixa rugosidade seriam os pontos de maior potencialidade eólica do país. No entanto esses estudos foram comprometidos por não considerarem a influência da

rugosidade e obstáculos próximos, o que foi viabilizado posteriormente pelo desenvolvimento da computação.

O MME mostra que simulações computacionais trouxeram uma nova perspectiva para o estudo do potencial eólico brasileiro. O uso dessas tecnologias permitiu análises mais aprofundadas dos dados anemométricos, obtendo resultado mais precisos e confiáveis. Os primeiros estudos com base na computação foram feitos pela CHESF em 1996 para análise do litoral do Ceará e do Rio Grande do Norte e utilizando-se de medições específicas dos ventos. Em 1999, a COPEL publicou o “Mapa do Potencial Eólico do Estado do Paraná”, estimando um potencial de geração de energia elétrica em 5,8 TWh/ano em locais com velocidades de vento superior a 6,5 m/s. Já utilizando medições anemométricas mais precisas e simulações computacionais, em 2000 a Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará elaborou o “Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará”, para alturas de 50 m e 70 m, revelando potencial estimado de 12,0 TWh/ano e 51,9 TWh/ano, respectivamente.

A consolidação dessas informações e a utilização de tecnologia precisa para aquisição e tratamento de dados culminaram na elaboração do “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro” pelo Ministério de Minas e Energia e outras instituições, no ano de 2001 [MME, 2017]. O documento constitui-se de dados sobre velocidade média, direção, regime e sazonalidade do vento, servindo de suporte confiável para a pré-avaliação quanto a instalação de parques eólicos no território nacional. Pelo estudo, obtido para uma altura de 50 m, onde velocidades de 7 m/s são observadas, estima-se um potencial de geração de energia elétrica no Brasil de 272,2 TWh/ano, sendo a metade vinda somente da região Nordeste (144,3 TWh/ano). Para tanto, seriam necessárias instalações de 143,5 GW, o que corresponderia a quase 50 mil turbinas eólicas de 3 MW. Segundo a Organização Mundial de Meteorologia, as condições geográficas para obter-se velocidades de vento igual a 7 m/s, a uma altura de 50 m, só estão disponíveis em cerca de 13% da superfície terrestre, sendo menos de 1% no território brasileiro. Em 2017, o MME construiu uma nova versão do atlas com simulações executadas em 2013. Dessa vez, complexa modelagem numérica em supercomputador foi utilizada, gerando informações sobre os ventos para alturas de 30, 50, 80, 100, 120, 150 e 200 m, que são mais adequadas aos equipamentos eólicos atuais e em desenvolvimento. O referido Atlas disponibiliza, de forma inédita, toda a base de dados consolidados e georreferenciados em ambiente web para livre consulta [MME, 2013]. A Figura 2 apresenta o mapa de densidade de potência do vento a uma altura de 100 m.

Figura 2. Densidade de potência do vento a 100 m de altura.



Fonte: [MME, 2013].

2.2 Desenvolvimento da energia eólica no Brasil

Desde os tempos mais antigos, assim como ocorrera com a energia hidráulica, a humanidade usa a energia eólica para benefício próprio, utilizando-se das forças dos ventos para impulsionar de embarcações, bombear água, moer grãos e outras aplicações de natureza mecânica [ANEEL, 2005]. Para geração de eletricidade, as primeiras tentativas ocorreram apenas no final do século XIX, através do escocês James Blyth, e somente em meados do século posterior surgem as primeiras turbinas em escala de megawatts, nos EUA [MME, 2016b]. A partir de 1973, com o grande aumento internacional do preço do petróleo, e até meados dos anos 1980, os EUA colocaram em prática um programa pioneiro de pesquisa e desenvolvimento. Esse programa, em parceria com a NASA, culminou em muitas das tecnologias para turbinas multi-megawatt utilizadas até hoje. Também na década de

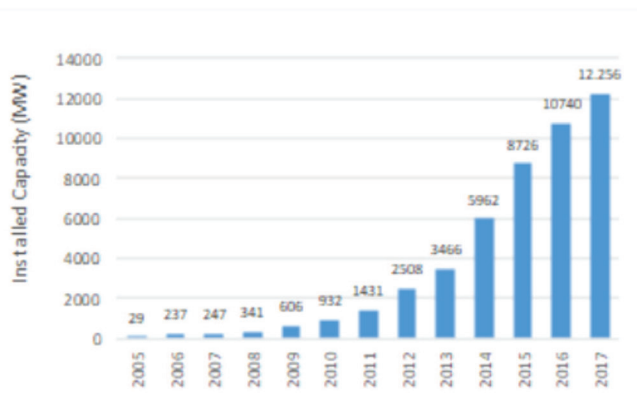
1870 a primeira turbina eólica comercial ligada a rede elétrica foi instalada na Dinamarca.

A utilização da energia dos ventos para geração de eletricidade em território brasileiro começou apenas no início da década de 1990, quando uma turbina de 75 kW foi instalada em Fernando de Noronha – PE, funcionando até hoje [ANEEL, 2005]. Em 2001 uma nova turbina foi instalada no arquipélago, suprimindo, em conjunto com a primeira, cerca de 25% da necessidade de eletricidade local. Já a Central Eólica da Taíba, localizada em São Gonçalo do Amarante – CE, foi a primeira a atuar como produtor independente no Brasil. A central possui 5 MW de potência instalada e teve início de suas operações no ano de 1999, segundo a ANEEL. Neste mesmo ano, também no Ceará, a Central Eólica da Prainha iniciou sua atividade com capacidade de 10 MW, tonando-se a maior do Brasil na época. Ainda nesse período outros empreendimentos eólicos foram sendo instalados, como: Central Eólica de Palmas – PR (2,5 MW), Central Eólica de Mucuripe – CE (com potência instalada inicial de 1,2 MW, foi desativada em 2000 e posteriormente reativada com potência de 2,4 MW), Central Eólica de Olinda – PE (utilizada para testes e experimentações) e Central Eólica de Bom Jardim – SC (0,6 MW), entre outras.

Após os primeiros empreendimentos de sucesso ao longo da década de 90 e já com uma importante base de conhecimento sobre o potencial eólico do país, o Brasil se depara com a necessidade de ampliar rapidamente sua oferta de energia elétrica. Esta necessidade viria para acelerar a oferta de energia elétrica de modo diminuir o risco de déficit que, no início do século, ultrapassava a margem dos 10%, segundo o MME [Eletrobrás, 2000]. Como uma das ações governamentais para aumento da oferta de energia, foi criado em 2002 o Programa de Incentivo a Fontes Alternativas – PROINFA, com o objetivo de subsidiar projetos de biomassa, de pequenas centrais hidroelétricas e de eólicas [DUTRA & SZKLO, 2006]. O programa criado através da Lei 10.438/2002, garantia a contratação de 3.300 MW entre as modalidades em sua primeira fase, impulsionando a energia eólica de 28 MW instalados em 2002 para 1.422 MW a mais em 2008. “Em sua segunda fase, o PROINFA estipula regras para a participação destas fontes renováveis de energia forneça 10% de toda a demanda de energia elétrica no Brasil [...]” num prazo de 20 anos, segundo [DUTRA & SZKLO, 2006]. O programa também estipula que 90% dos equipamentos sejam nacionalizados gerando, dessa forma, empregos e diversificação da matriz energética nacional, ao passo que reduziria as importações.

Através do PROINFA o Brasil pode alavancar sua produção de eletricidade através da energia eólica, galgando um lugar significativo no cenário mundial. Hoje, o país ocupa a nona colocação no ranking mundial de capacidade eólica instalada acumulada. O ranking é formado por China (168,7 MW), EUA (82,2 MW), Alemanha (50,0 MW), Índia (28,7 MW), Espanha (23,1 MW), Reino Unido (14,5 MW), França (12,1 MW), Canadá (11,9 MW), Brasil (10,7 MW), Itália (9,3 MW) e Resto do Mundo (75,6 MW) [GWEC, 2017]. A Figura 3 mostra a evolução da capacidade eólica instalada no Brasil ao longo dos anos.

Figura 3. Potencial eólico instalado acumulado, 2005 a 2017.



Fonte: [MME, 2016b].

2.3 Panorama atual da energia eólica no Brasil

A capacidade eólica instalada no Brasil está distribuída nas áreas litorâneas e em parte do interior do país. A potência total acumulada de 10,74 MW contabilizadas até 2016, representa um incremento de 2.014 MW em relação ao ano anterior. O total instalado corresponde a 430 parques compostos por mais de 6.000 turbinas eólicas [IEA, 2017]. A indústria eólica brasileira envolve o emprego de mais de 160 mil pessoas e representa investimentos na ordem de U\$ 22,8 bilhões acumulados até o ano de 2016. O Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico – SIGEL da Agência Nacional de Energia Elétrica apresenta, através da Figura 4, a distribuição

de todos os parques eólicos em operação no Brasil, atualizadas até dezembro de 2017.

Figura 4. Fornecimento de energia primária total no mundo.



Fonte: [IEA, 2017].

Complementarmente, a Tabela 1 apresenta um ranking de capacidade instalada e números de parques eólicos por estado brasileiro, mostrando sete dos nove estados da Região Nordeste entre os de maior capacidade atualmente.

A capacidade eólica registrada até 2016, sendo este o ano mais recente com informações consolidadas, mostra que a indústria dos ventos tem se tornado cada vez mais significativa para a produção de eletricidade no Brasil. As informações fornecidas pela ANEEL, esquematizadas através do Fluxo de Energia Elétrica [MME, 2017], mostra que a energia eólica compreende 5,4%

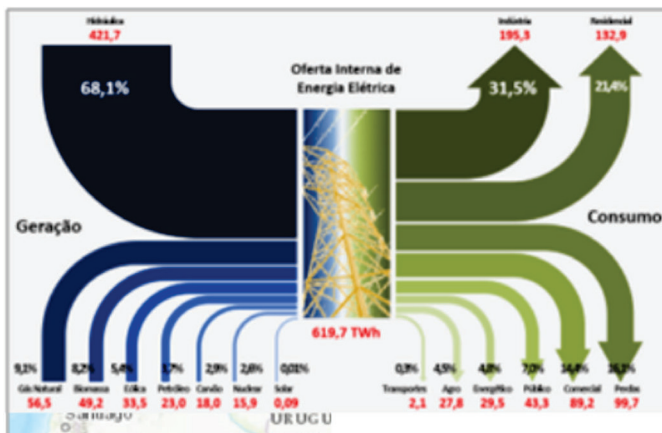
Tabela 1. Capacidade instalada por estado ao final de 2016 (MW).

Estado	Capacidade Instalada	Numero de Fazendas eolicas
RN	3.420	125
BA	1.898	73
CE	1.789	68
RS	1.695	72
PI	915	33
PE	651	29
SP	239	14
PB	69	13
SE	35	1
RJ	28	1
PR	3	1
Total	10.740	430

Fonte: [GWEC, 2017].

de total de energia elétrica produzida no país, num total de 33,5 TWh/ano produzidos através dos ventos, como mostra a Figure 5. O fluxo mostra também que houve grande aumento em relação ao ano anterior, quando a energia eólica representava 3,5% da matriz de geração de eletricidade brasileira, com 21,6 TWh de energia em 2015 [MME, 2016a].

Figura 5. Fluxo de eletricidade – balanço energético brasileiro 2017 e 2016.



Fonte: [MME, 2017].

Conforme observado na Figura 3, acrescenta-se que os dados de 2017 já apontam incremento de 1.516 MW no total instalado em relação ao ano anterior, elevando a capacidade eólica do país à 12.256 MW até o mês dezembro, segundo a ANEEL [ANEEL, 2017]. Existe ainda mais 130 novos empreendimentos eólicos em construção com potência total outorgada no valor de 2.934 MW e mais 102 com construção não iniciada, que acrescentará mais 2.245 MW na capacidade total instalada no país. Essa perspectiva levará o Brasil a um patamar de 17.435 MW para os próximos anos, podendo galgar posições no ranking mundial de produção eólica, como aponta a ANEEL.

2.4 A micro e a minigeração distribuída

A vasta área do território nacional não levada em consideração para fins de instalações de turbinas eólicas de grande escala em parques eólicos, abre espaço sistemas de pequeno porte, como os residenciais. Pensando nisso, a ANEEL promoveu em 2010 uma consulta pública e em 2011 uma audiência pública que obteve como resultado a elaboração da resolução normativa N°482 de 2012. Esta resolução estabelece “[...] as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, [...] criando [...] o sistema de compensação de energia elétrica correspondente” [ENEEL, 2016]. Este documento busca incentivar as pequenas centrais de geração e mostra que o sistema de geração próximo à carga traz os benefícios de “[...] postergar investimentos na expansão do sistema elétrico, baixo impacto ambiental, melhoria do nível de tensão da rede no período de maior demanda e a diversificação da matriz energética.”

Somando-se à regulamentação dos sistemas distribuídos de pequeno porte, no Brasil 21,3% do consumo de eletricidade é residencial, 14,8% é consumido por estabelecimentos comerciais e 15,1% são as perdas do sistema de geração e distribuição de energia elétrica [MME, 2016a]. Os sistemas de micro e minigeração de que trata a resolução citada anteriormente se encaixa perfeitamente para o uso residencial e comercial, fortalecendo a matriz de geração de energia elétrica, ao passo que diminui as perdas oriundas da geração e distribuição. Já nesse sentido, a ANEEL mostra que 47 unidades consumidoras possuem microgeração distribuída instalada na própria unidade e 2 unidades com centrais minigeradoras utilizando-se dos ventos, num total instalado de 10.168,10 KW [ENEEL, 2017]. A agência nos mostra ainda que a grande parte da geração distribuída vem do aproveitamento da energia do sol, onde 10.737 unidades possuem sistemas de micro e minigeração, totalizando uma capacidade instalada de 74.024,19 KW.

Esses dados nos mostram que poucas unidades geradoras através da energia eólica poderiam gerar a mesma quantidade das unidades que geram através do aproveitamento solar.

O presente capítulo se direciona justamente para as pesquisas sobre turbinas eólicas de pequeno porte, visando a contribuição para a microgeração distribuída para unidades consumidoras, principalmente residenciais, em regiões de disponibilidade de vento menos favorecidas.

3 Estudos sobre turbinas eólicas de eixo horizontal

3.1 Campos de estudos de turbinas eólicas

O estudo sobre sistemas de energia eólica está subdividido conforme propôs [YARAMASU et al., 2015]. O presente trabalho está delimitado pelo estudo das tecnologias mecânicas, aprofundando-se no estudo aeroelástico de turbinas, conforme Figura 6.

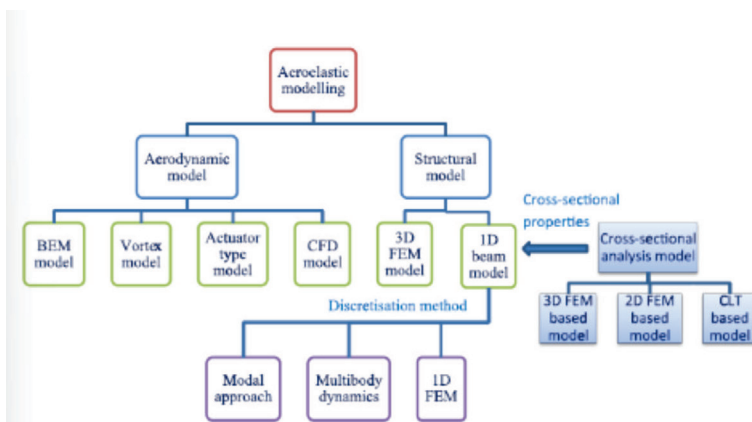
Figura 6. Fluxo de eletricidade – balanço energético brasileiro 2017 e 2016.



Fonte: [YARAMASU et al., 2015].

Os estudos aeroelásticos de turbinas eólicas podem ser divididos em estudos aerodinâmicos e estruturais, conforme Figura 7. Para a modelagem aeroelástica de pás de turbinas eólicas, deve ser incluído um modelo aerodinâmico para calcular as cargas aerodinâmicas exercidas pelo fluxo de ar que passa sobre as pás. Quatro tipos de modelos aerodinâmicos têm sido utilizados na modelagem aero-elástica de pás de turbinas eólicas, isto é, modelo BEM (modelo de elemento de lâmina), modelo de vórtice, modelo de atuador e modelo CFD (*computacional fluid dynamics*).

Figura 7. Composição dos estudos aeroelásticos de turbinas eólicas.



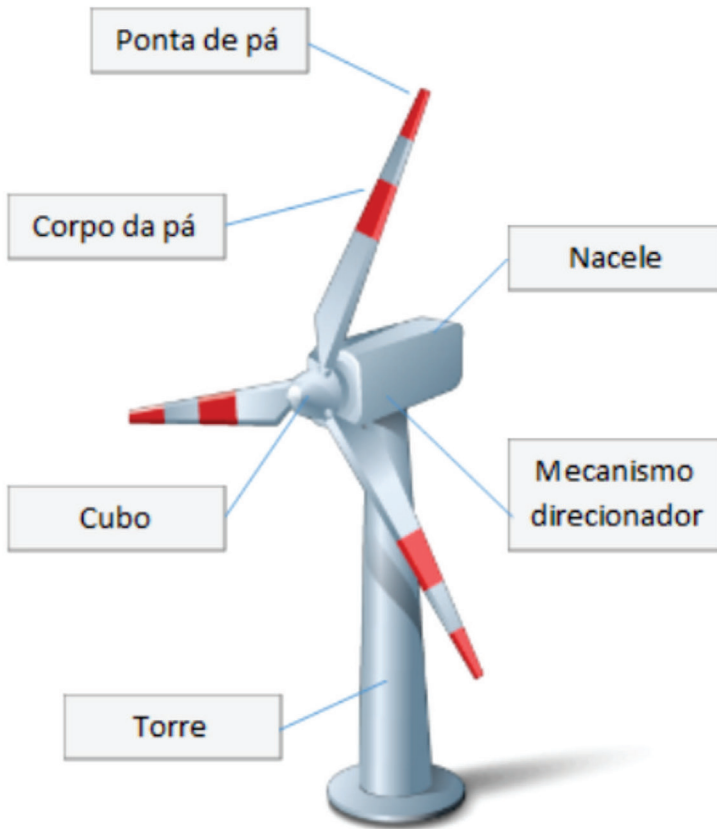
Fonte: [IEA, 2017].

O estudo aerodinâmico pode ser detalhado em partes da turbina eólica, conforme a Figura 8

4 Estudos sobre aerogeradores de eixo horizontal de pequeno porte

A força dos ventos vem sendo aproveitada pela humanidade desde os tempos mais antigos. Há registros de embarcações egípcias movidas pelo vento em 3.000 a.C. Os chineses já usavam moinhos de vento como forma de bombeamento de água em 2.000 a.C. Persas, entre os anos 500 e 900, inovaram ao usar o vento para moagem de grãos, criando também os primeiros aglomerados de equipamentos eólicos. Como meio de bombeamento e moagem, os moinhos de vento disseminam-se pela Europa

Figura 8. Partes de um gerador eólico.



Fonte: [IEA, 2017].

a partir do século XI. E em 1887, já no século XX, o escocês James Blyth gera eletricidade pela primeira vez através da energia eólica. Em pouco mais de meio século, no ano de 1941 nos EUA, surgem então as primeiras turbinas em escala de megawatts [TAJNE, 2015].

A necessidade de entender a dinâmica dos ventos e de desenvolver equipamentos que maximizem o aproveitamento dessa energia fizeram com que pesquisas começassem a surgir. Então, em 1952, Rosenbrock publica o trabalho "*An extension of the momentum theory of wind turbines*" [ROSENBROCK, 1952], onde justifica o valor aceito de 16/27 para o coeficiente de potência máximo (limite de Betz). O autor justifica também o conflito entre os valores observados e previstos do coeficiente de empuxo, através da falha de uma suposição inicial da teoria de momento. Apenas na década de 70 pesquisas voltadas para turbinas eólicas de eixo horizontal de pequeno porte começaram a surgir. Um resumo desses trabalhos, em ordem cronológica, é apresentado a seguir:

(1971 – 1980): Em 1979 Igra [IGRA, 1979] comparou a estimativa de custos de uma turbina eólica de eixo horizontal convencional com uma de vórtice aumentado gerado através de uma asa delta apropriada, chegando a conclusão de que esta poderia ter vantagem econômica aumentada a medida que a potência de saída é incrementada.

(1981 – 1990): Em 1981, Fletcher [FLETCHER, 1981] utiliza um difusor envolto de uma turbina eólica de eixo horizontal convencional, atingindo potência máxima com o perfil NACA 4418. O autor utiliza uma análise correspondente da teoria de momento de elemento de pá (*Blade Element Momentum Theory* – BEMT) e faz uma comparação experimental através de uma tela simulando a queda de pressão causada pela turbina. Obteve resultados similares e concluiu que a eficiência do difusor e o coeficiente de pressão no plano de saída são fatores determinantes para o desempenho da turbina.

Em 1983, o estudo de Vries [VRIES, 1983] intitulado "*On the theory of the horizontal-axis wind turbine*" apresenta as características aerodinâmicas das turbinas eólicas e o processo de conversão aerodinâmica, mostrando a aplicação das leis de conservação através da análise de tubos de fluxo simples e múltiplo. O autor faz também uma revisão sobre os métodos de cálculo para turbinas eólicas de eixo horizontal e método de experimentação e relata

que eram necessários dados mais completos e confiáveis sobre o desempenho aerodinâmico de HAWT.

(1991 – 2000): Em 1999, Mengelkamp realizou um estudo que investigou as condições de vento de uma complexa área na Alemanha central através de procedimento estatístico-dinâmico, apresentando similaridade com os dados reais para maiores velocidades e discrepâncias para velocidades de vento mais baixas [MENGELKAMP, 1999]. O estudo mostrou ainda que cálculos para a estimativa de produção de energia anual de 46 turbinas eólicas se assemelham com os dados reais.

Já em 2000, o estudo de Whale et al. [WHALE et al., 2000] analisa as propriedades dos vórtices gerados pela esteira aerodinâmica de uma turbina eólica de eixo horizontal de duas pás. Para tal, os autores fazem uma investigação experimental usando velocimetria de imagem de partículas ("*Particle Image Velocimetry*" – PIV), com os mapas de vorticidade comparados com o calculado através do método de malha de vórtices do rotor ("*Rotor Vortex Lattice Method*" – ROVLM), desenvolvido pela Universidade de Stuttgart. O comparativo mostrou um acordo qualitativo dos limites da esteira e quantitativo em termos do passo de vórtice da ponta.

(2001 – 2010): A partir do ano 2000 diversos trabalhos de pesquisa começaram a surgir de forma acelerada, seguindo a tendência de crescimento da capacidade eólica instalada no mundo [GWEC, 2016]. Destaca-se em 2006 o trabalho de Hansen et al. [HANSEN et al., 2006] que faz uma revisão abrangente da aeroelasticidade de turbinas eólicas, abordando os métodos aerodinâmicos e estruturais. Quanto aos métodos aerodinâmicos, uma revisão é realizada sobre a teoria de momento de elemento de pá, dos métodos de vórtice e de painel e as metodologias da fluidodinâmica computacional. O trabalho discute ainda métodos para modelagem estrutural de turbinas eólicas, fazendo um acoplamento entre a modelagem aeroelástica e estrutural. Mais tarde Wang et al. [WANG et al., 2008] fazem um trabalho semelhante destacando a metodologias para análises aerodinâmicas e estruturais.

Em 2007, Bahaj et al. [BAHAJ et al., 2007] fazem um estudo sobre o potencial de microgeração eólica em unidades residenciais urbanas do Reino Unido. Para tal, desenvolve a ferramenta μ -Wind, que prevê o rendimento energético e o período de retorno financeiro de microturbinas. O trabalho mostra que a ferramenta apresenta bom grau de precisão nas previsões.

Vitale e Rossi, em 2008 [VITALE & ROSSI, 2008], fazem uso do *software* “Zeus Simulador” de desenvolvimento próprio, que se utiliza da teoria BEM, para simular diversas turbinas eólicas de eixo horizontal comerciais de baixa potência. Considerando o projeto das lâminas essencial para o desenvolvimento de uma turbina, utiliza o software para obter a potência de saída e distribuição de forças ao longo da pá. Mostra ainda que os dados de desempenho obtidos se assemelham aos dados dos fabricantes e conclui que os valores máximos de potência foram menores que o do limite de Betz, causada por perdas de arrasto e da ponta para baixas rotações e velocidade de vento.

Também em 2008, Wang et al. [WANG et al., 2008] fazem uso da metodologia CFD para otimizar o projeto de uma espécie de concha envolta de uma turbina eólica de eixo horizontal, tendo como objetivo melhorar a captura de energia em condições de baixa velocidade de vento. Com o aparato foi possível aumentar o fluxo de ar em 1,5 vezes com potência aumentada em 2,2 vezes para a mesma área. Experimentos se assemelharam com os resultados obtidos computacionalmente.

(2011 – 2017): No ano de 2011, Sanderse et al. [SANDERSE et al., 2011] trazem uma revisão sobre a fluidodinâmica computacional utilizando diferentes técnicas de modelagem do rotor e da esteira aerodinâmica. Trata inicialmente das equações gerais, dos modelos de turbulência e das condições de contorno. Discute avanços recentes na abordagem da modelagem de disco atuador generalizado e do modelo direto, à medida que descreve a esteira. Quanto a esta, diferentes modelos de turbulência são empregados para estudar os efeitos da esteira aerodinâmica após a turbina. No final, o autor faz uma verificação dos métodos para atingir a precisão da malha. Também faz uma validação através de elaboradas experimentações de túnel de vento dada por Vermeer et al. [VERMEER et al., 2003].

Em 2014 Abrar et al. [ABRAR et al., 2014] investigam a viabilidade de usar uma turbina de ventilador comercial com 236,5 mm de diâmetro, como microturbina eólica de eixo horizontal para geração de eletricidade em áreas urbanas de Bangladesh. O trabalho consiste em aperfeiçoar essa turbina modificando seu design com auxílio da fluidodinâmica computacional. Posteriormente foram feitas análises experimentais e numéricas que apresentaram excelente similaridade qualitativa com as análises CFD. A máxima potência elétrica extraída pelo equipamento foi de

1,62 W à uma velocidade de 7,0 m/s e houve o incremento máximo do torque em 55% quando a velocidade de 6,0 m/s foi atingida.

Também em 2014, Rocha et al. [ROCHA et al., 2014] fazem uma investigação computacional enfatizada na calibração de um modelo de turbulência no que diz respeito à capacidade operacional de uma turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte. O coeficiente de potência é obtido em função da relação de velocidade de ponta para uma turbina de três pás construída e operada na Universidade Federal do Ceará, tendo seu valor máximo em cerca de 14%. O coeficiente de potência obtido numericamente está em acordo com os resultados experimentais.

Karthikeyan, et al. [KARTHIKEYAN et al., 2015], relatam que, em contraste com grandes turbinas eólicas de eixo horizontal instaladas em regiões de ventos bastante favoráveis, pequenos equipamentos têm sido instalados em regiões de condições adversas. Expõe ainda que os parâmetros associados à otimização da geometria das pás são importantes pois podem tornar turbinas pequenas tão eficientes quanto as de grande porte. O trabalho apresenta uma revisão detalhada de vários perfis aerodinâmicos e processos de otimização de geometria para alcançar o coeficiente de potência elevado em turbinas de pequeno porte, com número de Reynolds abaixo de 500.000.

Em 2016, Cai et al. [CAI et al., 2016] mostram que o desempenho das turbinas eólicas sofre grande influência do fluxo instável em torno das pás do rotor e que este estudo ainda é mal compreendido devido à física complexa envolvida. O estudo considera o cisalhamento do vento, o sombreamento da torre e o movimento de guinada através de metodologia CFD para uma turbina real instalada. Conclui que a interação lâmina-torre impõe grande impacto no desempenho da saída de potência.

Também em 2016, Lee et al. [LEE et al., 2016] fazem um importante trabalho sobre o ganho de desempenho aerodinâmico de uma de pá de turbina eólica de eixo horizontal típica, projetada por meio da teoria BEM, em relação a uma pá de perfil reto e de corda constante. Para o estudo foram feitos experimentos com túnel de vento para obter o coeficiente de potência e simulações numéricas para visualização do campo de fluxo. Tanto o método experimental quanto o numérico demonstraram aumento de 50% do coeficiente de potência da pá típica para a pá de perfil reto.

5 Considerações Finais

Este estudo destaca a vasta gama de possibilidades para o desenvolvimento de turbinas eólicas de eixo horizontal, especialmente no contexto de equipamentos de pequeno porte voltados para a microgeração residencial e rural. À medida que a demanda por soluções sustentáveis cresce, a exploração de tecnologias eólicas em menores escalas oferece uma resposta viável para a geração descentralizada de energia, beneficiando comunidades isoladas e reduzindo a dependência de fontes fósseis.

O mercado de microgeração eólica apresenta um potencial significativo, particularmente em regiões com condições favoráveis de vento. No entanto, ainda há desafios a serem enfrentados em termos de eficiência aerodinâmica, durabilidade e viabilidade econômica. A pesquisa em aerodinâmica de turbinas de pequeno porte pode contribuir para aumentar a eficiência e reduzir os custos associados, tornando a energia eólica mais acessível para consumidores residenciais e pequenos negócios.

É fundamental que o desenvolvimento de turbinas eólicas de pequeno porte continue a avançar, incorporando inovações tecnológicas que maximizem a captura de energia em condições de vento variáveis. Isso inclui o uso de materiais avançados, o aprimoramento de perfis aerodinâmicos e a aplicação de metodologias de otimização, como a fluidodinâmica computacional, para simular e prever o desempenho das turbinas em diferentes ambientes.

Assim, a microgeração distribuída por meio de turbinas eólicas de pequeno porte representa uma estratégia promissora para a diversificação da matriz energética e para a promoção da sustentabilidade. Ao explorar plenamente esse campo, o Brasil tem a oportunidade de expandir seu uso de energias renováveis, alinhando-se aos objetivos globais de mitigação das mudanças climáticas e promovendo o acesso equitativo à energia limpa.

Referências Bibliográficas

- [ANEEL, 2008] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. Brasília: [s.n.], 2008. Acesso em 01 05 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>.
- [IEA, 2017] International Energy Agency – IEA. *Key World Energy Statistics*. Paris: [s.n.], 2017. Acesso em 14 10 2017. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>.

- [MME, 2017] Ministério de Minas e Energia – MME. *Balanço Energético Nacional 2017 – Ano Base 2016*. Brasília: [s.n.], 2017. Acesso em 14 10 2017. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN-2017.pdf.
- [GWEC, 2016] Global Wind Energy Council – GWEC. *Global Wind Report – Annual Market Update 2015*. 2016. Acesso em 01 05 2017. Disponível em: <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-Report-2016.pdf>.
- [BP, 2017] BP. *Statistical Review of World Energy – 2016*. London: [s.n.], 2017. Acesso em 14 10 2017. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>.
- [MME, 2017] Ministério de Minas e Energias – MME. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. Brasília: [s.n.], 2001. Acesso em 21 abril 2017. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf.
- [MME, 2016a] Ministério de Minas e Energia – MME. *Balanço Energético Nacional 2016 – Ano Base 2015*. Brasília: [s.n.], 2016. Acesso em 22 04 2017. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN-2016.pdf.
- [ENEEL, 2017] Agência Nacional de Energia Elétrica – ENEEL. *Geração Distribuída*. Brasília: [s.n.], 2017. Acesso em 18 12 2017. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp.
- [MME, 2013] Ministério de Minas e Energias – MME. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro – Simulações 2013*. Brasília: [s.n.], 2017. Acesso em 14 10 2017. Disponível em: <http://novoatlas.cepel.br/wp-content/uploads/2017/07/Novo-Atlas-do-Potencial-Eolico-Brasileiro-SIM-2013.pdf>.
- [ANEEL, 2005] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. Brasília: [s.n.], 2005. Acesso em 01 05 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/download.htm>.
- [MME, 2016b] Ministério de Minas e Energia – MME. *Energia Eólica no Brasil e no Mundo – Ano de Referência 2015*. 2016. Acesso em 01 10 2017. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/documentos/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica+-+ano+ref+2015+\(3\).pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2](http://www.mme.gov.br/documentos/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica+-+ano+ref+2015+(3).pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2).

- [Eletrobrás, 2000] Eletrobrás. *Plano Decenal de Expansão 2000-2009*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2000. Acesso em 01 11 2017. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Km21AAAAIAAJ>.
- [DUTRA & SZKLO, 2006] DUTRA, R. M.; SZKLO, A. S. *A energia eólica no Brasil: Proinfa e o novo modelo do setor elétrico*. In: *Anais do XI Congresso Brasileiro de Energia – CBE*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006. II, pp. 842–868.
- [GWEC, 2017] Global Wind Energy Council – GWEC. *Global Wind Report – Annual Market Update 2016*. Brussels, Belgium: [s.n.], 2017. Acesso em 14 10 2017. Disponível em: <http://gwec.net/publications/global-wind-report-2/>.
- [ANEEL, 2017] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. *Banco de Informações de Geração – BIG*. 2017. Acesso em 22 12 2017. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>.
- [ENEEL, 2016] Agência Nacional de Energia Elétrica – ENEEL. *Caderno Temático ANEEL – Micro e minigeração distribuída*. 2016. Acesso em 22 04 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documentos/656877/14913578/Caderno+Tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66fd7f65516>.
- [TAJNE, 2015] TAJNE, P. *Wind Energy Timeline – From Persian Windmills Crushing Grains to Vesta’s Wind Turbines Churning out 8 MW of Output*. 2015. Acesso em 09 05 2017. Disponível em: <http://www.altenergymag.com/article/2015/04/wind-energy-timeline-%E2%80%93-from-persian-windmills-crushing-grains-to-vesta%E2%80%99s-wind-turbines-churning-out-8-mw-of-output/19496/>.
- [ROSENBROCK, 1952] ROSENBROCK, H. B. An extension of the momentum theory of wind turbines: A more general statement of the theory than has hitherto been given leading to some explanation of the discrepancies with practice. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, v. 24, pp. 226–227, 1952.
- [IGRA, 1979] IGRA, O. Cost-effectiveness of the vortex-augmented wind turbine. *Energy*, v. 4, pp. 119–130.
- [YARAMASU et al., 2015] Yaramasu, V.; Wu, B.; Sen, P. C.; Kouro, S.; Narimani, M. High-power wind energy conversion systems: State-of-

- the-art and emerging Technologies. *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, n. 5, pp. 740–788, 2015.
- [FLETCHER, 1981] FLETCHER, C. A. J. Computational analysis of diffuser-augmented wind turbines. *Energy Con. & Mgmt*, vol. 21, pp. 175–183, 1981.
- [VRIES, 1983] VRIES, O. D. On the theory of the horizontal-axis wind turbine. *Annual Reviews Fluid Mech.*, vol. 15, pp. 77–96, 1983.
- [MENGELKAMP, 1999] MENGELKAMP, H. T. Wind Climate Simulation over Complex Terrain and Wind Turbine Energy Output Estimation. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 63, pp. 129–139, 1999.
- [WHALE et al., 2000] WHALE, J.; ANDERSON, C. G.; BAREISS, R.; WAGNER, S. An experimental and numerical study of the vortex structure in the wake of a wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 84, pp. 1–21, 2000.
- [HANSEN et al., 2006] HANSEN, M. O. L. SØRENSEN, J. N. VOUTSINAS, S.; SØRENSEN, N.; MADSEN, H. A. State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity. *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 42, pp. 285–330, 2006.
- [WANG et al., 2008] WANG, F.; BAI, L.; FLETCHER, J.; WHITEFORD, J.; ULLEN D. The methodology for aerodynamic study on a small domestic wind turbine with scoop. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, pp. 1–24, 2008.
- [BAHAJ et al., 2007] BAHAJ, A. S.; MYERS, L.; JAMES P. A. B. Urban energy generation: Influence of micro-wind turbine output on electricity consumption in buildings. *Energy and Buildings*, vol. 39, pp. 154–165, 2007.
- [VITALE & ROSSI, 2008] VITALE, A. J.; ROSSI A. P. Software tool for horizontal-axis wind turbine simulation. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, pp. 3460–3465, 2008.
- [SANDERSE et al., 2011] SANDERSE, B.; PIJL, S. P.; KOREN, B. Review of computational fluid dynamics for wind turbine wake aerodynamics. *Wind Energy*, vol. 14, pp. 799–819, 2011.

- [VERMEER et al., 2003] VERMEER, L.; SØRENSEN, J. N.; CRESPO, A. Wind turbine wake aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 39, pp. 467–510, 2003.
- [ABRAR et al., 2014] ABRAR, M. A.; MAHBUB, A. M. I.; MAMUN, M. Design optimization of a horizontal axis micro wind turbine through development of CFD model and experimentation. *Procedia Engineering*, vol. 90, pp. 333–338, 2014.
- [ROCHA et al., 2014] ROCHA, P. A. C.; ROCHA, H. H. B.; CARNEIRO, F. O. M.; SILVA, M. E. V.; BUENO, A. V. κ - ω SST (shear stress transport) turbulence model calibration: A case study on a small scale horizontal axis wind turbine. *Energy*, vol. 65, pp. 412–418, 2014.
- [KARTHIKEYAN et al., 2015] KARTHIKEYAN, N.; MURUGAVEL, K. K.; KUMAR, S. A.; RAJAKUMAR S. Review of aerodynamic developments on small horizontal axis wind turbine blade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 801–822, 2015.
- [CAI et al., 2016] CAI, X.; GU, R.; PAN, P.; ZHU, J. Unsteady aerodynamics simulation of a full-scale horizontal axis wind turbine using CFD methodology. *Energy Conversion and Management*, vol. 112, pp. 146–156, 2016.
- [LEE et al., 2016] LEE, M.-H.; SHIAH, Y.; BAI, C.-J. Experiments, ; numerical simulations of the rotor-blade performance for a small-scale horizontal axis wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 149, pp. 17–29, 2016.

Utilização de sedimentos de lagoa como fertilizante no cultivo de girassol

Tiago de Abreu Lima¹ e Franklin Aragão Gondim¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE,
Campus de Maracanaú, Brasil

1 Introdução

Os problemas ambientais podem ser divididos em âmbitos locais, regionais ou globais. Os problemas locais podem ser caracterizados como a poluição do ar, por exemplo. A chuva ácida pode se tornar um problema regional, e temos o aumento da temperatura do planeta a nível global [GOLDEMBERG & VILLANUEVA, 2003]. A partir destes estudos torna-se necessária a busca por alternativas que tenham como objetivo minimizar os efeitos causados pela poluição de forma geral.

As lagoas, que são reservatórios de menor porte, são de extrema relevância para localidades que convivem frequentemente com períodos de seca [NETO et al., 2011]. É através desses reservatórios que surge a possibilidade do ser humano praticar a agricultura de subsistência, à oferta de água e pesca [ANNOR et al., 2009]. Um dos problemas ambientais a serem enfrentados é a poluição em ecossistemas lacustres. Devido o despejo inadequado de resíduos sólidos urbanos e efluentes não tratados, por exemplo, tem-se o acúmulo de sedimentos nesses ambientes, o que ocasiona uma série de problemas, como a eutrofização, a modificação da sua geometria, além da redução da capacidade de armazenamento [ARAÚJO et al., 2006]. Portanto, é necessário que se adote

medidas corretivas que visem manter a disponibilidade e a qualidade dos corpos hídricos nos níveis desejados. Medeiros em 2015 destacou que dentre as medidas corretivas dos processos de eutrofização e assoreamento destaca-se a retirada dos sedimentos de fundo dos reservatórios. Devido a ampla oferta de nutrientes, como o fósforo, o nitrogênio e matéria orgânica, no sedimento [ESTEVES, 2011], advindos do despejo incorreto de resíduos, poluição, entre outros, o uso deste tipo de resíduo na agricultura pode melhorar as características físicoquímicas do solo, elevando a produtividade e a sua qualidade, assim como, reduzindo os custos de sua produção [JUNIOR et al., 2005].

As oleaginosas são plantas que apresentam um alto teor de óleo nas suas sementes e frutos, portanto, são associadas à utilização na produção de óleo vegetal e na produção de biodiesel, por exemplo. O Girassol, que é um exemplo de oleaginosa, é uma planta muito utilizada na alimentação humana e animal, por ser uma importante fonte de proteínas, além da participação na produção de mel, devido a seu potencial atrativo da flor para as abelhas [FREIRE, 2016].

A produção de girassol desperta interesse no mercado de todo o mundo, integrando os sistemas de produção de grãos e biocombustíveis devido ao curto ciclo de vida juntamente com a alta produtividade no rendimento de óleo em seus grãos [NOBRE et al., 2010]. Deste modo, é um desafio elevar a produção do girassol e reduzir os custos de seu cultivo.

2 Sedimentos de lagoa

A lagoa pode ser definida como um corpo d'água de menor porte comparado a outros reservatórios, podendo ser naturais ou artificiais. Esses reservatórios vêm sofrendo grandes impactos com a poluição urbana. A eutrofização é um desses problemas. Esse fenômeno se trata do enriquecimento dos corpos hídricos por nutrientes, produzindo um aumento de macrófitas aquáticas, florações de cianobactérias e algas verdes. Esses fatores ocasionam alterações nos padrões de potabilidade da qualidade da água, prejudicando o seu uso para o consumo humano, por exemplo. Além da eutrofização, ocorre o acúmulo de sedimentos ao fundo do reservatório e na coluna da água que são advindos de diversas fontes de poluição, como o despejo irregular de efluentes líquidos não tratados nesses corpos hídricos. Assim, os sedimentos do ecossistema de água doce constituem um compartimento ambiental importante, pois possuem a capacidade de armazenar ou liberar compostos

como o nitrogênio e o fósforo para a coluna de água e esses compostos podem ser utilizados no cultivo de plantas, por exemplo [WIEGAND et al., 2014].

3 Girassol

O girassol é uma planta originária da América do Norte, sendo uma espécie herbácea, dicotiledônea, cultivada em diferentes localidades do planeta. A grande relevância da cultura do girassol no mundo se deve à ótima qualidade do óleo que se extrai de sua semente. Dentre as diversas formas de utilização, destaca-se a geração de energia, pois é utilizado como matéria-prima na produção de biodiesel. O girassol também é bastante utilizado como planta ornamental na decoração de jardins [FREIRE, 2016]. Além disso, é uma espécie que tem como características diferenciais a resistência à seca e também é capaz de se adaptar em diferentes temperaturas [EMBRAPA CNPSO, 2000].

No processo de melhoramento e desenvolvimento da cultura, a destinação dos frutos, entretanto, foi redirecionada para a extração de óleo, a qual hoje é a principal finalidade do girassol [GAZZOLA et al., 2012]. O girassol está entre as espécies vegetais de maior potencial para a produção de energia renovável no Brasil, além de se constituir em importante opção para o produtor agrícola em sistemas envolvendo rotação ou sucessão de culturas. Dentre os seus usos estão a produção de forragem alternativa, planta melífera, ornamental e a produção de óleo para alimentação humana [NOBRE et al., 2010]. No Brasil, o girassol é uma cultura promissora, por sua ampla adaptação a diferentes ambientes e excelente qualidade do óleo e, ainda, por estar inserido no Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel [PNPB] [UNGARO, 2006]. Para que se possa elevar a participação de biocombustíveis na matriz energética do país e diminuir a dependência energética provenientes dos combustíveis fósseis, os quais são poluentes e ocasionam uma série de problemas ambientais e impactos na saúde humana, se torna assim uma oportunidade para a cultura do girassol como grande fornecedora dessa matéria prima [ALMEIDHA, 2011].

O processo de extração do óleo de girassol pode ser feito de forma simples e artesanal. Nesse processo a produção é feita em pequena proporção e o óleo é retirado pela prensagem contínua dos grãos. Logo após a prensagem o óleo segue para uma etapa de filtração ou de decantação cuja finalidade é a de separar resíduos. No método industrial, o óleo de girassol vai ser

prensado e passará por extratores para que seja feita a extração por solvente (hexano - derivado de petróleo).

4 Biodiesel

O biodiesel é um combustível composto por ésteres monoalquilícos de ácidos graxos de cadeia longa, decorridos de óleos vegetais ou gorduras animais, adquirido comumente por reação de transesterificação, onde advém a formação do éster monoalquilíco (biodiesel) e glicerol [TAPANES, 2013]. A utilização de biodiesel como combustível alternativo vem proporcionando um potencial promissor no mundo inteiro, sendo um mercado que cresce aceleradamente, devido a sua enorme contribuição ao meio ambiente, com a redução qualitativa e quantitativa dos níveis de poluição ambiental – diminuição do efeito estufa e chuva ácida [DAROCH et al., 2013].

No tocante à produção mundial de biodiesel, observa-se que houve forte crescimento nos últimos doze anos, correspondendo neste período com um aumento na produção de 2.812%, uma média de 235% ao ano, totalizando em 2012 com 22,5 bilhões de litros/ano [MME, 2013]. Constata-se que de 2005 a 2013 houve crescimento na capacidade instalada de biodiesel, em virtude da obrigatoriedade da regulamentação imposta no país obtendo atualmente uma capacidade instalada 7.553 bilhões de litros em fevereiro de 2014 [ANP, 2014]. Assim, percebe-se o gradativo crescimento da produção de biocombustíveis no âmbito internacional, porém devido o alto custo com a produção e distribuição algumas empresas ainda resistem quanto à produção do mesmo.

Inegavelmente, o Biodiesel é empregado como combustível por força da lei 11.097 em 2005, expandindo as funções da ANP, de fiscalizar e regular as atividades referentes à produção, controle de qualidade, distribuição, venda e comercialização do Biodiesel e dos “blend” (mistura óleo Diesel – Biodiesel), bem como o marco regulatório de introdução do Biodiesel em 2% em volume a partir de 2008, subindo gradativamente a 20% até em 2020. Em 2014, pela lei 13.033, o percentual de Biodiesel aplicado de 6% de Biodiesel em mistura com Diesel e em 2015, o percentual era de 7% e por fim, em 23 de março de 2016, a lei 13.263 altera o percentual para 8% durante o ano, 9% em até 24 meses e 10% em até 36 meses, procurando atender o cronograma inicial de incremento de Biodiesel na mistura de combustível.

Então, com o notório aumento do percentual de biodiesel na composição dos combustíveis utilizados no transporte mundial a quantidade de

poluentes na atmosfera tende a cair gradativamente com o passar do tempo, contudo apenas a implantação de novas leis obrigando a utilização de quantidades específicas não será suficiente para solucionar o problema.

5 Considerações Finais

Os sedimentos de lagoas demonstram um potencial significativo como aliados no combate à poluição, tanto dos recursos hídricos quanto atmosféricos. A remoção e reutilização desses sedimentos, frequentemente ricos em nutrientes, possibilitam não apenas a melhoria da qualidade da água, mas também a criação de valor sustentável quando aplicados como fertilizantes no cultivo de plantas oleaginosas, como o girassol.

O aproveitamento dos nutrientes contidos nos sedimentos contribui para a melhoria das propriedades do solo e favorece o desenvolvimento de culturas agrícolas destinadas à produção de biocombustíveis. O girassol, em particular, destaca-se devido à sua adaptabilidade e ao alto teor de óleo em suas sementes, sendo uma matéria-prima promissora para a produção de biodiesel. Dessa forma, o uso de sedimentos de lagoa no cultivo do girassol representa uma abordagem prática e sustentável para integrar o tratamento de resíduos à geração de energia renovável.

Adotar práticas de reutilização desses sedimentos não só reduz a dependência de fertilizantes convencionais, mas também proporciona uma solução ecológica para o manejo de resíduos aquáticos. Isso resulta em um ciclo virtuoso, onde a remediação de ambientes aquáticos degradados e a produção de energia sustentável andam lado a lado, promovendo uma agricultura mais resiliente e ecologicamente responsável.

A integração de sedimentos de lagoas na cadeia produtiva de biocombustíveis demonstra o potencial de soluções locais e inovadoras para enfrentar desafios globais. Assim, pesquisas futuras devem se concentrar em otimizar essas práticas, promovendo o uso de recursos renováveis e sustentáveis, que favorecem a conservação ambiental e contribuem para a prosperidade global.

Referências Bibliográficas

[JUNIOR et al., 2005] JUNIOR, C. H., et al. Uso agrícola de resíduos orgânicos potencialmente poluentes: propriedades químicas do solo e produção vegetal. In: *Tópicos Ciência do Solo*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 4, pp. 391–470.

- [ALMEIDHA, 2011] ALMEIDHA, L. *Girassol é tema de estudo em evento*. 2011. Acesso em: 14 maio 2022. Disponível em: <http://www.ledinaldoalmeida.com.br/ler.asp?id=2373&titulo=noticias>.
- [ANNOR et al., 2009] ANNOR, F. O., et al. *Delineation of small reservoirs using radar imagery in a semi-arid environment: A case study in the upper east region of ghana*. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 34, n. 4, pp. 309–315, 2009.
- [ANP, 2014] Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Combustível – ANP. *Resolução ANP nº 63, de 5.12.2014-DOU 8.12.2014. Regulamenta a especificação do querosene de aviação*. 2014. Acesso em: 15 de março. 2023. Disponível em: <http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes.anp/2014/dezembro/ranp%2063%20-%202014.xml>.
- [ARAÚJO et al., 2006] ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid brazil. *Hydrological Sciences Journal*, v. 51, n. 1, pp. 157–170, 2006.
- [DAROCH et al., 2013] DAROCH, M.; GENG, S.; WANG, G., et al. Recent advances in liquid biofuel production from algal feed stocks. *Applied Energy*, v. 102, pp. 1371–1381, 2013.
- [EMBRAPA CNPSO, 2000] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA CNPSO. *Sistema de produção: girassol*. Londrina: EMBRAPA CNPSO, 2000.
- [ESTEVES, 2011] ESTEVES, F. A. Eutrofização artificial. In: ESTEVES, F. A. (Ed.). *Fundamentos de Limnologia*. 3. ed., Rio de Janeiro – RJ: Editora Interciência, 2011. pp. 625–655.
- [GAZZOLA et al., 2012] GAZZOLA, A., et al. *A cultura do girassol*. Piracicaba–SP: [s.n.], 2012.
- [GOLDEMBERG & VILLANUEVA, 2003] GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L. D. *Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento*. São Paulo: Edusp, 2003.
- [FREIRE, 2016] FREIRE, J. D. O. *Cultivo do girassol irrigado sob diferentes lâminas de água e doses de nitrogênio*. 2016.
- [NETO et al., 2011] NETO, I. E.; WIEGAND, M. C.; ARAÚJO, J. C. de. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large

- semi-arid brazilian basin. *Hydrological Sciences Journal*, v. 56, n. 2, pp. 319–333, 2011.
- [NOBRE et al., 2010] NOBRE, R. G., et al. Crescimento e floração do girassol sob estresse salino e adubação nitrogenada. *Revista Ciência Agronômica*, v. 41, n. 3, pp. 358–365, 2010.
- [TAPANES, 2013] TAPANES, N. C. Biodiesel no brasil: Matérias primas e tecnologias de produção. *Acta Scientiae e Technicae*, v. 1, n. 1, Fevereiro 2013.
- [UNGARO, 2006] UNGARO, M. R. Potencial da cultura do girassol como fonte de matéria-prima para o programa nacional de produção e uso de biodiesel. In: CAMARA, G. M.; HEIFFIG, L. S. (Ed.). *Agronegócio de plantas oleaginosas: matérias primas para o biodiesel*. Piracicaba: ESALQ, 2006. pp. 57–80.
- [WIEGAND et al., 2014] WIEGAND, M. C., et al. O sedimento como fonte de fósforo em açudes eutrofizados do semiárido. In: *Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos*. 11. João Pessoa: ABRH, 2014. pp. 1–11.

Posfácio

O Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) tem o prazer de concluir esta obra com uma reflexão que consolida o espírito de inovação, ensino e impacto social presentes ao longo dos textos aqui apresentados. No contexto de nossa missão de formar cidadãos críticos e transformar realidades, este trabalho exemplifica um compromisso contínuo com a pesquisa, a formação docente e o avanço científico.

O livro “Avanços em Energias Renováveis” apresenta não apenas uma seleção de resultados acadêmicos de vanguarda, mas uma visão de futuro que nos desafia a construir soluções concretas para os problemas energéticos e socioambientais da atualidade. Reunimos contribuições de especialistas dos programas de pós-graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET), que celebrou seus 10 anos de funcionamento em 2023, do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER), que completa 10 anos em 2024, e do Programa de Pós-Graduação da Rede Nordeste de Ensino (RENOEN), refletindo a integração de saberes que permeia as ações do IFCE.

A diversidade dos temas aqui explorados, que vão do desenvolvimento do hidrogênio verde até o aproveitamento de resíduos agroindustriais, simboliza o papel essencial da pesquisa científica em moldar um futuro mais justo e sustentável. Cada capítulo, cada projeto descrito, e cada ideia compartilhada são um testemunho do trabalho conjunto entre professores, pesquisadores e alunos, todos movidos por um desejo comum de promover a transformação e enfrentar os desafios globais.

Esta obra é também uma oportunidade de agradecimento a todos que participaram direta ou indiretamente de sua construção. Aos autores, pesquisadores, orientadores e colaboradores, nossa gratidão por contribuírem para que as discussões sobre energia renovável avancem e inspirem novas gerações. Seu trabalho reflete o melhor de nossa prática científica, orientada para um desenvolvimento humano que respeite os limites do planeta e promova a dignidade social.

Que este livro sirva como uma plataforma de debate, inspiração e ação, incentivando novas perspectivas e soluções na área de energias renováveis e além.

GLENDO DE FREITAS GUIMARÃES
Coordenador do PPGET

Sobre os autores

Antonio Jonatas da Silva Barros

IFCE – Campus Maracanaú

É um profissional com Mestrado em Energias Renováveis na área de Mecânica Aplicada à Conservação do Meio Ambiente, Licenciatura em Química e duas formações técnicas: Química Industrial e Edificações, todas realizadas no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Possui ainda duas especializações, sendo uma em Metodologia do Ensino de Química e outra em Gestão e Educação Ambiental, com esta última em fase de conclusão.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1222724553273113>

Auzuir Ripardo de Alexandria

IFCE – Campus Fortaleza

Auzuir Ripardo de Alexandria é cientista da computação, engenheiro eletricitista (pela UFPB), pesquisador e professor com mestrado e doutorado em Engenharia de Teleinformática pela UFC. Atualmente, atua como docente no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET), no Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER), na Rede Nordeste de Ensino (RENOEN, Doutorado), em Engenharia de Mecatrônica e no curso de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial. Além disso, aprecia o trabalho em equipe e interdisciplinar, tendo atuado nos últimos anos no design, coordenação e execução de projetos interdisciplinares, com histórico em projetos nas áreas de Engenharia Biomédica e Informática em Saúde, Robótica e Visão Computacional, Inteligência Artificial, entre outros. Suas principais competências incluem: Visão Computacional, Robótica,

Computação em Nuvem, C++ e Inteligência Artificial. Pesquisador do LABMAX/IFSP. Pesquisador afiliado do Istituto Italiano di Tecnologia (IIT).

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2784997614182231>

E-mail: auzuir@ifce.edu.br

Bruno César Barroso Salgado

IFCE – Campus Maracanaú

Possui graduação em Tecnologia em Processos Químicos pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará (CEFET-CE) (2007), mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFCE) (2009) e doutorado em Química pela Universidade Federal do Ceará (2016). Atualmente é professor do Eixo de Química e Meio Ambiente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) / Campus Maracanaú, onde coordena o Laboratório de Tecnologia em Processos Ambientais (LTPA) e o Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) do IFCE. É líder do Grupo de Pesquisa em Química Ambiental (GPQAmb) e membro do Comitê Técnico Científico do Parque Tecnológico Itaipu. Tem experiência na área de Química, atuando principalmente nos seguintes temas: Processos Oxidativos Avançados, conversão fotocatalítica seletiva de biomassa, produção fotocatalítica de hidrogênio (H₂) e desenvolvimento e validação de métodos analíticos para quantificação de contaminantes orgânicos e metais pesados em matriz aquosa.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0573677979512967>

E-mail: brunocesar@ifce.edu.br

Caio Façanha de Oliveira

IFCE – Campus Maracanaú

Possui graduação em Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Atualmente é estudante de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) do IFCE.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9061039868806534>

Daniela Cadore Vale

IFCE – Campus Maracanaú

Profissional com expertise em Planejamento e Controle de Projetos e Obras complexas, com foco em gerenciamento de custos e contratos, atuando em grandes empresas como Eneva e Suzlon Energia Eólica. Experiência em desenvolvimento e gestão financeira de CAPEX e OPEX, controle de custos, análise de forecast orçamentário e criação de relatórios via ERP SAP. Forte competência em gestão de contratos, incluindo acompanhamento de garantias, entregáveis de engenharia e execução de obras, além de análise de conformidade no fluxo de medição de contratos e faturamento. Domínio em otimização de processos de análise de dados e geração de relatórios gerenciais usando Power BI. Atuação em suprimentos e gestão de equipes multidisciplinares, promovendo alinhamento estratégico com foco em resultados.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2194088313453081>

Erick França De Oliveira

IFCE – Campus Maracanaú

Possui licenciatura em Química pelo IFCE e atualmente é discente de mestrado em Energias Renováveis, atuando na linha de pesquisa de hidrogênio verde.

E-mail: erickf1993@gmail.com

Francisco Avelino

Universidade Federal do Ceará – UFC

Bacharel em Química com Habilitação em Química Industrial pela Universidade Federal do Ceará (2014) com período sanduíche na Universidade de Coimbra (2012-2013), Mestre em Química pela Universidade Federal do Ceará (2017) e Doutor em Química pela Universidade Federal do Ceará (2019). Foi Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico (EBTT) do Instituto Federal do Ceará (IFCE) de 2019 a 2024 e Coordenador de Pesquisa, Extensão e Pós-Graduação (CPEPG) IFCE – Campus Iguatu de

2022 a 2024. Foi o fundador e líder do Grupo de Biopolímeros e Materiais Avançados (GBioMat) (2019 a 2024). É membro permanente do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Maracanaú. Foi bolsista de produtividade em pesquisa da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) (2020 a 2022 e 2023 a 2024). Atualmente, é Professor Adjunto-A do Departamento de Química Orgânica e Inorgânica (DQOI) da Universidade Federal do Ceará (UFC) e bolsista de produtividade em desenvolvimento tecnológico e extensão inovadora do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Coordena e desenvolve suas atividades de pesquisa no Laboratório de Produtos e Tecnologia em Processos (LPT) do DQOI – UFC, atuando nas áreas de biorefinaria, valorização da biomassa, química de polímeros e química de materiais, com foco na utilização de resíduos agroindustriais, principalmente, os resíduos sólidos do coco, como matéria-prima na obtenção de biomoléculas de alto valor agregado com ênfase na química de lignina, prospectando o potencial da lignina em diversos segmentos da indústria química, especificamente, no desenvolvimento de novos materiais adsorventes e materiais compósitos.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3894889552646841>

E-mail: avelino@ufc.br

Francisco Frederico dos Santos Matos

IFCE – Campus Maracanaú

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Ceará (1996) e título de Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2002). Atuou como Engenheiro pesquisador e desenvolvedor de produto na Whirlpool S.A. durante 4 anos e 11 meses, onde obteve experiência na área de Eficiência Energética, com ênfase em válvulas automáticas acionadas pelo próprio escoamento de gás. Atualmente é Professor titular e pesquisador do IFCE, atuando como docente no mestrado PPGER (Mestrado Acadêmico em Energias Renováveis) e na graduação em Engenharia Mecânica, onde leciona nas disciplinas de Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos, Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional, Refrigeração e Máquinas Térmicas. Pesquisa nas áreas de

Engenharia Mecânica, dentro dos temas de Energias Renováveis e Eficiência Energética.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8204044573317813>

E-mail: fred.matos@ifce.edu.br

Francisco Ícaro Carvalho Aderaldo

Universidade de São Paulo – USP

Doutorando em Ciências da Engenharia Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC/USP). Mestre em Energias Renováveis, graduado em Engenharia Ambiental e Sanitária, e técnico em Agropecuária, ambas as formações realizadas pelo Instituto Federal do Ceará (IFCE). Pós-graduado em Engenharia de Segurança do Trabalho, com MBA em Gestão da Qualidade. Atualmente, é pesquisador do Núcleo de Estudos de Política Ambiental (NEPA). Possui experiência e habilidades na elaboração e execução de estudos, pareceres e relatórios técnicos ambientais, com foco em temas como Avaliação de Impacto Ambiental, Avaliação Ambiental Estratégica, Licenciamento Ambiental, Educação Ambiental, Ecofisiologia Vegetal, Inventário Florestal, Geoprocessamento e Gestão Ambiental, de Recursos Hídricos e de Resíduos Sólidos.

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/1427040925037767>

E-mail: icaroaderaldo@usp.br

Francisco Nélio Costa Freitas

IFCE – Campus Fortaleza

Pós-Doutorado em Metalurgia Física, Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais, Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais e Engenheiro Mecânico. Professor Efetivo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), atuando fortemente na pesquisa por meio de orientações de mestrado e iniciação científica. Professor permanente do programa de pós-graduação em Energias Renováveis (PPGER) do IFCE, onde atua na linha de pesquisa Mecânica Aplicada à Conservação do Meio

Ambiente desenvolvendo projetos de pesquisa nas áreas de caracterização de materiais, eficiência energética em processos de fabricação e aços elétricos.

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/1834964619080647>

E-mail: fneliocf@ifce.edu.br

Franklin Aragão Gondim

IFCE – Campus Maracanaú

Possui graduação (bacharelado e licenciatura) em Ciências Biológicas (2006), mestrado em Bioquímica (2008) e doutorado em Bioquímica (2012), todos pela Universidade Federal do Ceará. Atua como Professor do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará desde 2008 (atualmente leciona no Campus Maracanaú). Professor do Programa de pós-graduação em Energias Renováveis do IFCE. Tem experiência na área de Bioquímica e fisiologia vegetal, Botânica, com ênfase em Ecofisiologia Vegetal, atuando principalmente nos seguintes temas: estresse salino, estresse hídrico, feijão-de-corda, milho, girassol, mamona, peróxido de hidrogênio e estresse oxidativo.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4207075808724945>

E-mail: aragaofg@ifce.edu.br

Izamaro de Araújo

IFCE – Campus Jaguaribe

Possui formação Técnica em Eletromecânica (2002) e graduação Tecnológica em Eletromecânica (2003) pelo Instituto Centro de Ensino Tecnológico – CENTEC. É Especialista em Ensino de Física pela Universidade Federal do Ceará – UFC (2014) e Mestre em Energias Renováveis (2019) pelo Instituto Federal do Ceará – Campus Maracanaú. Atuou como Desenhista Técnico de projetos mecânicos pela LCR Metalúrgica (2003-2004), como Operador de Subestação Elétrica na Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará – COGERH (2004-2008) e como Instrutor de Nível Superior no Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI (2008-2010). Desde 2010 é professor efetivo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE, Campus Jaguaribe, tendo atuado também como coordenador

de setores e cargo gerencial. Atua no Eixo de Controle e Processos Industriais nas especialidades de Processos de Fabricação e Projetos de Máquinas. É pesquisador nas áreas de Projetos de Máquinas, com foco em tecnologias aditivas, e de Turbinas Eólicas, utilizando fluidodinâmica computacional (CFD), cujo trabalho resultou em depósito de patente.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2194088313453081>

Lázaro Henrique Pereira

IFCE – Campus Maracanaú

Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – Campus Juazeiro do Norte. Especialista em Gestão e Educação Ambiental (UNIASSELVI) e em Geoprocessamento (PROMINAS). Mestre em Energias Renováveis pelo Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – Campus Maracanaú. Atua na área de Consultoria Ambiental e possui experiência nas áreas de poluição de ecossistemas aquáticos, recuperação de áreas degradadas, geoprocessamento e licenciamento ambiental.

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/2313314793441724>

E-mail: lazaro.henrique.pereira07@aluno.ifce.edu.br

Marcelo Monteiro Valente Parente

IFCE – Campus Fortaleza

Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará -IFCE Campus Fortaleza. Possui Graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Ceará (1996), Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE) (1999) e Doutorado em Química Inorgânica pela Universidade Federal do Ceará (2006). Vem desenvolvendo pesquisa relacionada a purificação da glicerina oriunda da produção de biodiesel e síntese de novos produtos a partir desta glicerina. Também vem atuando nas áreas relacionadas ao estudo de corrosão por técnicas eletroquímicas. Professor e orientador do mestrado acadêmico em energias renováveis do IFCE.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6890118483209098>

E-mail: marceloparente@ifce.edu.br

Matheus Freire Porto

IFCE – Campus Maracanaú

Químico formado pelo IFCE, com foco em fotocatalise e métodos oxidativos avançados, Mestrando em energias renováveis pelo IFCE. Técnico em redes de computadores pela EEEP Paulo VI.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7410312979161760>

E-mail: matheus.freire.porto61@aluno.ifce.edu.br

Tiago de Abreu Lima

IFCE – Campus Maracanaú

Graduação completa em Engenharia Ambiental e Sanitária pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Especialização completa em: Sustentabilidade e Políticas Públicas, Administração Pública e Gestão Ambiental, Licenciamento Ambiental e Recuperação Ambiental de Áreas Degradadas e Contaminadas. Mestre em Energias Renováveis (IFCE), onde atuou como Pesquisador no Laboratório de Bioquímica e Fisiologia Vegetal. Atua como Consultor Ambiental, onde desenvolve execução de estudos, pareceres técnicos e relatórios ambientais nos seguintes temas: resíduos sólidos, licenciamento ambiental, avaliação de impacto ambiental e gestão ambiental.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8436560925325499>

E-mail: tiagoabreu.engamb@gmail.com

Sobre os organizadores

Antonio Nunes de Oliveira

IFCE – Campus Cedro

É licenciado em Física pela Universidade Estadual do Ceará (UECE/2008), mestre em Ensino de Ciências e Matemática pela Universidade Federal do Ceará (UFC/2013), especialista em Ensino de Astronomia pela Cruzeiro do Sul (Cruzeiro do Sul Virtual/2021) e doutor em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG/2023). Foi aluno do Curso de Bacharelado em Direito da Universidade Regional do Cariri (URCA) e aluno do Curso de Licenciatura em Matemática da Universidade Estadual do Ceará, Faculdade de Educação, Ciências e Letras de Iguatu (UECE/FECLI). Cursa doutorado em Ensino pelo Programa de Pós-Graduação em ENSINO da Rede Nordeste de Ensino (RENOEN|IFCE). Atuou como professor do curso de Licenciatura em Física da UECE/FECLI durante o período 2010-2013. Foi professor efetivo no Instituto Federal do Pará (IFPA/CRMB), onde atuou na educação do campo e no PAFOR, trabalhando com os povos indígenas, quilombolas e assentados. Foi professor efetivo no Instituto Federal do Piauí – IFPI/CAMPUS PICOS e também no Instituto Federal do Ceará – IFCE Sobral, tendo atuado como professor e coordenador do Curso de Licenciatura em Física do IFCE Sobral. Entre 2014 e 2017 atuou como professor convidado no projeto Ibaorebu, coordenado pela FUNAI juntamente com o IFPA e o povo indígena Munduruku. É coordenador e idealizador de algumas ações de divulgação e popularização da Ciência, dentre elas o Evento Científico Unificado: Jornada de Física, uma ação que reúne anualmente estudantes e professores da Educação Básica e dos cursos de Licenciatura em Física do Brasil e outros países. Atualmente é servidor do quadro efetivo no IFCE campus Cedro, onde atua como professor na Licenciatura em Física, em cursos Técnicos e desenvolve pesquisas em

Ensino de Física (com ênfase em Física Moderna e Contemporânea), em Ensino de Ciências e Matemática. É professor colaborador do Programa de Pós-Graduação (Mestrado Acadêmico) em Ensino de Ciências e Matemática (PGECM) do IFCE, revisor de periódicos nacionais e editor associado do Jornal Mato-Grossense de Física. Atua frequentemente em ações de divulgação e popularização da Ciência.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0413684696036057>

E-mail: nunes.vieira@ifce.edu.br

Auzuir Ripardo de Alexandria

IFCE – Campus Fortaleza

Auzuir Ripardo de Alexandria é cientista da computação, engenheiro eletricitista (pela UFPB), pesquisador e professor com mestrado e doutorado em Engenharia de Teleinformática pela UFC. Atualmente, atua como docente no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET), no Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER), na Rede Nordeste de Ensino (RENOEN, Doutorado), em Engenharia de Mecatrônica e no curso de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial. Além disso, aprecia o trabalho em equipe e interdisciplinar, tendo atuado nos últimos anos no design, coordenação e execução de projetos interdisciplinares, com histórico em projetos nas áreas de Engenharia Biomédica e Informática em Saúde, Robótica e Visão Computacional, Inteligência Artificial, entre outros. Suas principais competências incluem: Visão Computacional, Robótica, Computação em Nuvem, C++ e Inteligência Artificial. Pesquisador do LABMAX/IFSP. Pesquisador afiliado do Istituto Italiano di Tecnologia (IIT).

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2784997614182231>

E-mail: auzuir@ifce.edu.br

Bruno César Barroso Salgado

IFCE – Campus Maracanaú

Possui graduação em Tecnologia em Processos Químicos pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará (CEFET-CE) (2007), mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência

e Tecnologia (IFCE) (2009) e doutorado em Química pela Universidade Federal do Ceará (2016). Atualmente é professor do Eixo de Química e Meio Ambiente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) / Campus Maracanaú, onde coordena o Laboratório de Tecnologia em Processos Ambientais (LTPA) e o Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) do IFCE. É líder do Grupo de Pesquisa em Química Ambiental (GPQAmb) e membro do Comitê Técnico Científico do Parque Tecnológico Itaipu. Tem experiência na área de Química, atuando principalmente nos seguintes temas: Processos Oxidativos Avançados, conversão fotocatalítica seletiva de biomassa, produção fotocatalítica de hidrogênio (H_2) e desenvolvimento e validação de métodos analíticos para quantificação de contaminantes orgânicos e metais pesados em matriz aquosa.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0573677979512967>

E-mail: brunocesar@ifce.edu.br

Francisco Frederico dos Santos Matos

IFCE – Campus Maracanaú

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Ceará (1996) e título de Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2002). Atuou como Engenheiro pesquisador e desenvolvedor de produto na Whirlpool S.A. durante 4 anos e 11 meses, onde obteve experiência na área de Eficiência Energética, com ênfase em válvulas automáticas acionadas pelo próprio escoamento de gás. Atualmente é Professor titular e pesquisador do IFCE, atuando como docente no mestrado PPGER (Mestrado Acadêmico em Energias Renováveis) e na graduação em Engenharia Mecânica, onde leciona nas disciplinas de Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos, Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional, Refrigeração e Máquinas Térmicas. Pesquisa nas áreas de Engenharia Mecânica, dentro dos temas de Energias Renováveis e Eficiência Energética.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8204044573317813>

E-mail: fred.matos@ifce.edu.br

Glendo de Freitas Guimarães

IFCE – Campus Fortaleza

Formado em Física pela Universidade Federal do Ceará (2004), com mestrado em Física pela Universidade Federal de Pernambuco (2006) e doutorado em Engenharia de Teleinformática pela Universidade Federal do Ceará (2011). Realizou Pós-doutorado em Fotônica na Universidade da Borgonha, na França. Atualmente é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, líder do Laboratório de Fotônica do Instituto, membro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da UFC. Trabalha com pesquisas no campo da óptica não-linear, sensoriamento óptico, comunicações ópticas, dispositivos fotônicos e nanofotônica.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7107196337237668>

E-mail: glendofreitas@ifce.edu.br

João Carlos da Costa Assunção

IFCE – Campus Fortaleza

Possui graduação em Química Industrial pela Universidade Federal do Ceará (2002), mestrado em Química Orgânica pela mesma universidade (2004) e doutorado em Química Orgânica (2008). Atualmente é professor efetivo do Instituto Federal do Ceará (IFCE) – Campus Maracanaú, docente e pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) desde 2014 e coordenador do curso de Licenciatura em Química. Tem experiência na área de Química, com ênfase em Química de Produtos Naturais, Biocatálise e Biocombustíveis.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8873683560219910>

E-mail: joaocarlos@ifce.edu.br

Sandro César Silveira Jucá

IFCE – Campus Fortaleza

Possui Nivelamento Universitário (Studienkolleg) na Technische Hochschule Köln – Alemanha, Graduação em Tecnologia Mecatrônica e Especialização

em Docência para Educação Profissional e Tecnológica (EPT) pelo IFCE. É Especialista em Automação Industrial e Licenciado em Física pela Universidade Estadual do Ceará (UECE), Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela UFC com pesquisa na Universität Paderborn – Alemanha e Bolsa do Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD). Realizou pós-doutorado com Bolsa da Fundación Carolina na Universidad de Cádiz – Espanha. Professor titular e pesquisador no IFCE, atua em Mestrados ProfEPT (Educação Profissional e Tecnológica em rede nacional), PPGER (Mestrado Acadêmico em Energias Renováveis), e no Doutorado Acadêmico da Rede Nordeste de Ensino (RENOEN). Pesquisa nas áreas de Engenharia Elétrica, Mecatrônica e Educação Profissional, dentro dos temas: Energias Renováveis, Sistemas Embarcados, IoT, Robótica e EaD.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0543232182796499>

E-mail: sandrojuca@ifce.edu.br

Avanços em Energias Renováveis reúne pesquisas e práticas inovadoras para enfrentar os desafios da transição energética sustentável. A obra abrange temas da vanguarda da Ciência e da Tecnologia, desde o potencial do hidrogênio verde como combustível do futuro até a utilização de robótica e inteligência artificial no setor energético. Também apresenta soluções ecológicas para a reutilização de resíduos e o desenvolvimento de novas tecnologias em energia solar e eólica.

Destinado a pesquisadores, profissionais e estudantes, este livro oferece uma visão abrangente das tendências atuais e futuras no campo das energias renováveis, promovendo o debate e o desenvolvimento de estratégias para um mundo mais sustentável.

