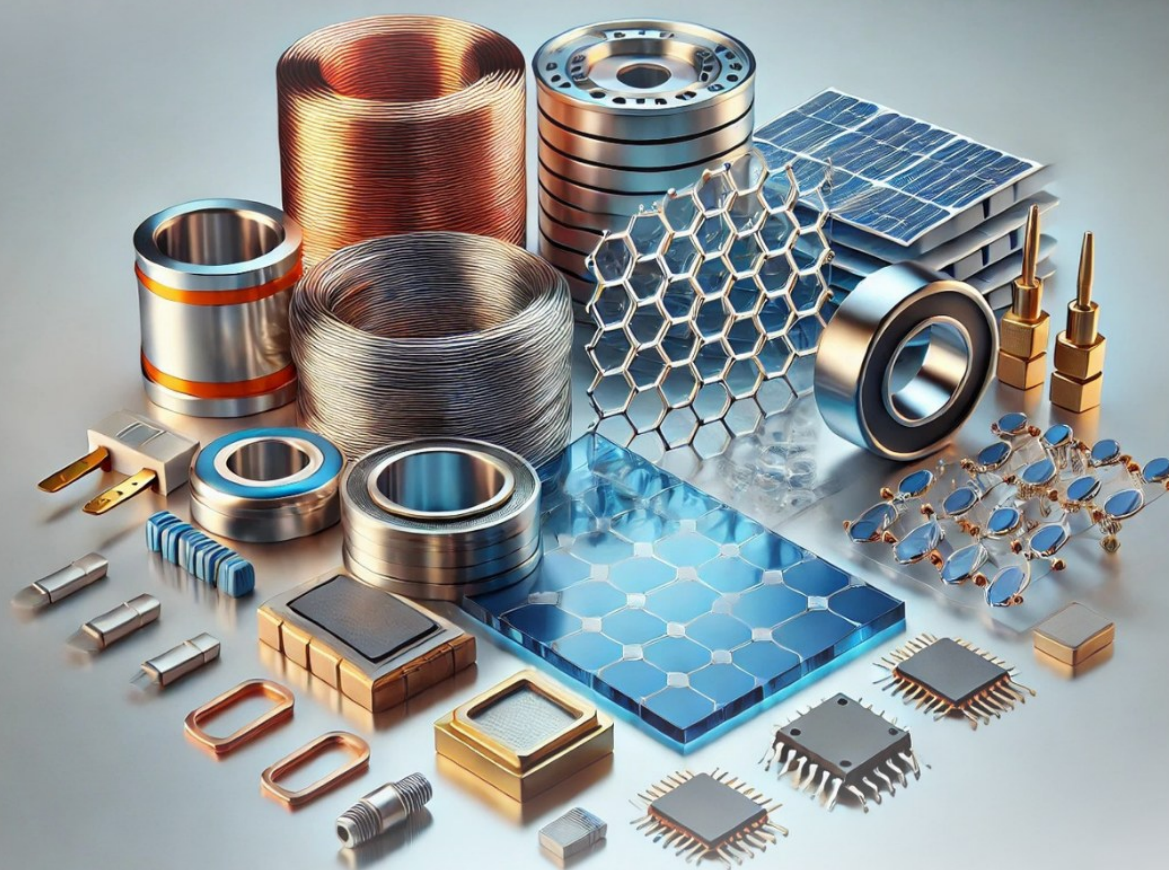


ANAIS DO III WORKSHOP DE MATERIAIS ELÉTRICOS DA ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA-EST DA UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS-UEA



WEVERSON DOS SANTOS CIRINO
ORGANIZADOR

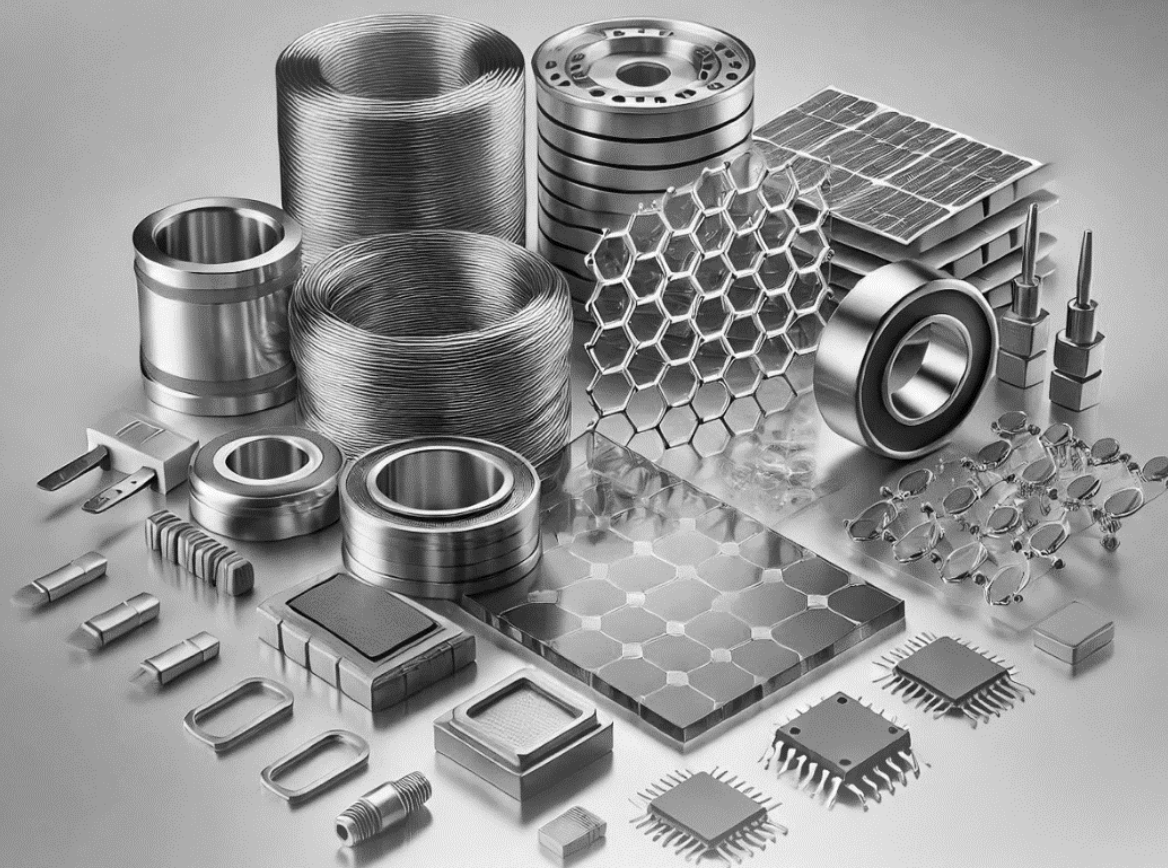


UNIVERSIDADE
DO ESTADO DO
AMAZONAS



AMPLLA
EDITORA

ANAIS DO III WORKSHOP DE MATERIAIS ELÉTRICOS DA ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA-EST DA UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS-UEA



WEVERSON DOS SANTOS CIRINO
ORGANIZADOR



**UNIVERSIDADE
DO ESTADO DO
AMAZONAS**



AMPLLA
EDITORA



2025 - Ampla Editora

Copyright da Edição © Ampla Editora

Copyright do Texto © Os autores

Editor Chefe: Leonardo Tavares

Design da Capa: Ampla Editora

Revisão: Os autores

Anais do III Workshop de Materiais Elétricos da Escola Superior de Tecnologia-EST da Universidade do Estado do Amazonas-UEA está licenciado sob CC BY-NC 4.0.



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

ISBN: 978-65-5381-321-2

DOI: 10.51859/ampla.wme212.1125-0

Ampla Editora

Campina Grande – PB – Brasil

contato@amplaeditora.com.br

www.amplaeditora.com.br



2025

Comissão Organizadora

Jucimar Maia
Jozias Parente
Weverson Cirino

Autores dos Trabalhos

Antony Alexsandrey Marques de Souza
Carla Vitoria Ribeiro Oliveira
Carlos Felipe Bezerra de Lima
Celio Neves de Oliveira
Celso Vitor Leao Martins
Daniel Amud Rodrigues
Daniel Deyvison Pinheiro Batista
Edmundo Alves dos Santos Neto
Eduardo Barbosa Caldeira
Edvaldo Canuto de Vasconcelos
Gabriel Pinheiro de Souza
Guilherme Gomes de Assis
Jean Victor Lopes Mendes
Jerrah Guimaraes Carobeira de Araujo
Jheneffer Thayna Oliveira Bentes
Joao Paulo Modesto Damiano
Kevin Carlos Tavares de Freitas
Luiz Victor dos Santos de Moraes
Matheus de Freitas Ferreira
Matheus Filipe Ferreira do Carmo
Rayssa Andrade Martins
Rayssa Maia Gomes
Ricardo Henrique Paiva Leao
Yasmin Simas da Silva
Weverson dos Santos Cirino



2025 - Ampla Editora

Copyright da Edição © Ampla Editora

Copyright do Texto © Os autores

Editor Chefe: Leonardo Tavares

Design da Capa: Ampla Editora

Revisão: Os autores

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

A532

Anais do III Workshop de Materiais Elétricos da Escola Superior de Tecnologia-EST da Universidade do Estado do Amazonas-UEA / Organização de Weverson dos Santos Cirino; Prefácio de Jucimar Maia da Silva Júnior. – Campina Grande/PB: Ampla, 2025.

Livro em PDF

ISBN 978-65-5381-321-2

DOI 10.51859/ampla.wme212.1125-0

1. Engenharia elétrica. 2. Materiais elétricos. 3. Anais de evento científico. I. Cirino, Weverson dos Santos (Organizador). II. Silva Júnior, Jucimar Maia da (Prefácio). III. Título.

CDD 621.3

Índice para catálogo sistemático

I. Engenharia elétrica

Ampla Editora

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



2025

Prefácio

É com muita alegria que apresentamos os Anais do 3º Workshop de Materiais Elétricos, realizado no dia 10 de setembro de 2025, na Universidade do Estado do Amazonas (UEA). Este encontro já se tornou um ponto de encontro especial entre alunos, professores e pesquisadores, um espaço para compartilhar ideias, mostrar resultados e aprender em conjunto.

Nesta edição, os trabalhos reunidos mostram bem a diversidade e a riqueza da área. Temos pesquisas que tratam de assuntos clássicos - como o uso de cobre e alumínio em transformadores - e outras que exploram temas de ponta, como as células solares e o grafeno. Essa mistura de temas tradicionais e inovadores revela a capacidade dos nossos estudantes e orientadores de conectar teoria com prática e pensar soluções que fazem diferença, tanto na eficiência energética quanto na sustentabilidade.

Mais do que artigos técnicos, o que vemos aqui é a prova de que a universidade é um espaço vivo, onde o aprendizado se transforma em criação e inovação. Cada pesquisa apresentada é fruto do empenho de jovens que, ao mesmo tempo em que aprendem, também contribuem para a ciência e para a sociedade.

Desejamos que estes anais sejam uma fonte de inspiração, despertem novas ideias e incentivem mais colaborações. Que cada página sirva para mostrar que a ciência não para, e que o futuro está sendo construído, pouco a pouco, em cada estudo e cada descoberta.

Agradecemos de coração a todos que tornaram este workshop possível: organizadores, professores, avaliadores e, principalmente, os estudantes, que dão vida a tudo isso.

Prof. Dr. Jucimar Maia da Silva Júnior
Diretor da Escola Superior de Tecnologia (EST)
da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Sumário

CAPÍTULO I. PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO GRAFENO E SEU IMPACTO NA INDÚSTRIA ELETRÔNICA	7
CAPÍTULO II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE ISOLADORES ELÉTRICOS APLICADOS EM SUBESTAÇÕES DE MÉDIA E BAIXA TENSÃO	20
CAPÍTULO III. ESTUDO BIBLIOGRÁFICO SOBRE A EFICIÊNCIA DAS CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA	31
CAPÍTULO IV. EFEITO DOS MATERIAIS CONDUTORES NAS PERDAS DE ENROLAMENTO EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO	41
CAPÍTULO V. ANÁLISE DA DISSIPAÇÃO TÉRMICA E SUAS RELAÇÕES COM ALTERAÇÕES ELÉTRICAS NOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM OPERAÇÃO	50
CAPÍTULO VI. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CONDUTORES DE COBRE E ALUMÍNIO	64
CAPÍTULO VII. ANÁLISE COMPARATIVA DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE METAIS PUROS (COBRE E ALUMÍNIO) E LIGAS METÁLICAS (LATÃO E BRONZE)	73
CAPÍTULO VIII. ESTUDO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ENVOLVIDOS NO DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO DE SPDA'S	79
CAPÍTULO IX. UMA ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA SOBRE MATERIAIS AVANÇADOS PARA ELETRÔNICA FLEXÍVEL: APLICAÇÃO DE GRAFENO, NANOTUBOS DE CARBONO E POLÍMEROS CONDUTORES EM DISPOSITIVOS FLEXÍVEIS (WEARABLES, TELAS DOBRÁVEIS)	89

Capítulo 1

PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO GRAFENO E SEU IMPACTO NA INDÚSTRIA ELETRÔNICA

DOI: 10.51859/ampla.wme212.1125-1

Célio N. De Oliveira ¹
Celso V. Leão Martins ²
Gabriel P. De Souza ³
Weverson dos Santos Cirino ⁴

¹ Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)
Rua José Da Gama e Abreu, n 686, Petrópolis, CEP: 69067-380
Manaus, AM, Brasil, E-mail: cndo.eng22@uea.edu.br

² Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)
Av Cecília Meireles, Condomínio Ponta Negra II, Rua Menphis, Casa 7, CEP: 69037-077
Manaus, AM, Brasil, E-mail: cvlm.eng22@uea.edu.br

³ Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)
Rua Beco Almínio Nogueira, n 121, Japiim, CEP: 69076-646
Manaus, AM, Brasil, E-mail: gpds.eng22@uea.edu.br

⁴ Professor Efetivo do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)
Rua Rio Umatumã, n 312, Conjunto Colina do Aleixo, Bairro São José Operário I, CEP: 69085-286
Manaus, AM, Brasil, E-mail: wdsantos@uea.edu.br

Resumo: O grafeno destaca-se como um material bidimensional com propriedades excepcionais, como elevada mobilidade eletrônica, excelente condutividade térmica e flexibilidade mecânica, tornando-o promissor para aplicações em eletrônica e optoeletrônica. Este documento analisa suas propriedades fundamentais e faz uma comparação do seu desempenho com o de outros materiais tradicionais como silício e óxido de índio e estanho (ITO), especialmente em transistores, sensores e eletrodos transparentes. Também é abordado o uso dos dicalcogenetos metálicos de transição (TMDCs) em conjunto com o grafeno, que oferecem alternativas com bandgap adequado para lógica digital. O que inclui os desafios relacionados à sua confiabilidade: como oxidação, instabilidade térmica e degradação em substratos flexíveis. E Por fim, são avaliadas as perspectivas de mercado do Grafeno e dos TMDCs em setores estratégicos, como energia, biomedicina, construção e eletrônica, ressaltando a necessidade de superar barreiras tecnológicas para viabilizar a sua adoção comercial.

Palavras-chave: Grafeno; condutividade elétrica; eletrônica flexível; transistores; nanomateriais.

Abstract: Graphene stands out as a two-dimensional material with exceptional properties, such as high electron mobility, excellent thermal conductivity and mechanical flexibility, making it promising for applications in electronics and optoelectronics. This document analyzes its fundamental properties and compares its performance with traditional materials such as silicon and indium tin oxide (ITO), especially in transistors, sensors and transparent electrodes. The use of transition metal dichalcogenides (TMDCs) in conjunction with graphene is also addressed, offering alternatives with adequate bandgap for digital logic. This includes the challenges related to their reliability, such as oxidation, thermal instability and degradation on flexible substrates. Finally, the market prospects for graphene and TMDCs in strategic sectors, such as energy, biomedicine, construction and electronics, are evaluated, highlighting the need to overcome technological barriers to enable their commercial adoption.

Keywords: Graphene, Electrical Conductivity, Flexible Electronics; Transistors, Nanomaterials.

1. INTRODUÇÃO

Desde sua descoberta experimental em 2004 por Andre Geim e Konstantin Novoselov, o grafeno tem se destacado como um dos materiais mais promissores da ciência moderna, despertando amplo interesse nas comunidades científica e tecnológica. A obtenção do material por meio da esfoliação mecânica do grafite contrariou expectativas teóricas sobre a instabilidade de estruturas bidimensionais, o que rendeu aos autores o Prêmio Nobel de Física em 2010 e impulsionou o início de uma nova era na física do estado sólido e na engenharia de materiais.

O grafeno é constituído por uma única camada de átomos de carbono organizados em uma rede hexagonal plana, com apenas um átomo de espessura. Essa estrutura confere ao material uma combinação de propriedades físicas e eletrônicas excepcionais, como alta condutividade elétrica (da ordem de $\sim 10^6$ S/cm), mobilidade eletrônica ultraelevada (acima de $200.000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ em condições ideais) e a observação do efeito Hall quântico a temperatura ambiente. Além disso, seus portadores de carga comportam-se como férmions de Dirac sem massa, regidos por uma relação linear entre energia e momento, o que lhe confere uma estrutura de bandas singular, o chamado cone de Dirac.

Essas características colocam o grafeno em posição de destaque frente a semicondutores convencionais, como o silício, e viabilizam sua aplicação em uma nova geração de dispositivos eletrônicos mais rápidos, miniaturizados, flexíveis e energeticamente eficientes. No contexto da crescente demanda por tecnologias de alto desempenho, o grafeno surge como um candidato-chave para aplicações em transistores de alta frequência, sensores eletrônicos de alta sensibilidade, eletrônica flexível e dispositivos optoeletrônicos avançados.

Este artigo tem como objetivo analisar de forma abrangente as propriedades elétricas do grafeno, bem como explorar suas principais aplicações tecnológicas na indústria eletrônica. Adicionalmente, busca-se discutir os desafios técnicos e industriais que ainda limitam sua adoção em larga escala, além de apresentar o papel dos dicalcogenetos de metais de transição (TMDCs) como materiais complementares em dispositivos híbridos baseados em grafeno. Por fim, são examinadas as perspectivas futuras e o potencial impacto desses materiais bidimensionais em setores estratégicos da economia.

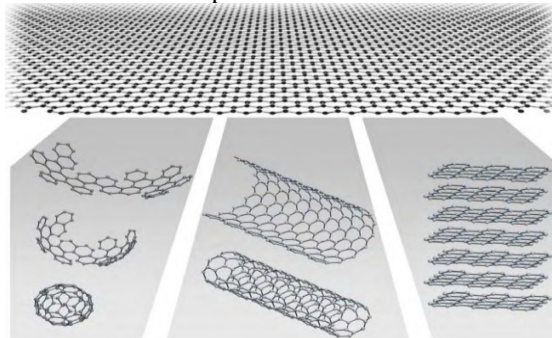
2. O GRAFENO E AS SUAS PROPRIEDADES

O grafeno é um material bidimensional constituído por uma única camada de átomos de carbono organizados em uma rede hexagonal plana, semelhante a um favo de mel. Essa

estrutura cristalina não corresponde a uma rede de Bravais simples, uma vez que sua célula unitária contém dois átomos de carbono distintos, denominados sítios A e B. Cada átomo forma três ligações σ fortes com seus vizinhos mais próximos (hibridização sp^2), deixando um orbital p_z não hibridizado. Esse orbital p_z , orientado perpendicularmente ao plano da camada, é responsável pela formação das ligações π e π^* fundamentais para as propriedades eletrônicas do grafeno.

O carbono pode formar diversas estruturas alotrópicas, entre elas o fulereno, os nanotubos de carbono e o grafite, todos intimamente relacionados ao grafeno. A figura 1 ilustra essas formas: à esquerda, os fulerenos, caracterizados por sua geometria esférica ou quase esférica, com aplicações na nanotecnologia; ao centro, os nanotubos de carbono, que apresentam elevada resistência mecânica e propriedades elétricas excepcionais, formados por enrolamento do grafeno em estruturas tubulares; e à direita, o grafite, composto por múltiplas camadas de grafeno empilhadas por interações de Van der Waals, sendo a principal matéria-prima para a extração do grafeno.

Figura 1 - Estruturas alotrópicas de carbono associadas ao grafeno.



Fonte: A.K. Geim e K.S. Novoselov (2007).

Do ponto de vista, estrutural, o grafeno pode ser descrito como a menor espessura possível de carbono, com altura equivalente a um único átomo. Essa característica confere ao material uma combinação única de propriedades físico-químicas e eletrônicas que o tornam especialmente atrativo para aplicações avançadas na eletrônica, fotônica e nanociência.

Diversos métodos vêm sendo empregados para a obtenção do grafeno, sendo a Deposição química de Vapor (Chemical Vapour Deposition – CDV) um dos mais eficazes em termos de qualidade do material obtido. Nesse processo, hidrocarbonetos são decompostos em substratos metálicos, como o cobre, em ambiente controlado de vácuo, com temperaturas em torno de 1000°C . Embora a técnica produza grafeno com excelente cristalinidade, a transferência do material para outros substratos pode comprometer suas propriedades elétricas. Estratégias alternativas vêm sendo desenvolvidas, como o uso de camadas

intermediárias de óxido ou polímeros de suporte que facilitam a separação sem comprometer a integridade estrutural.

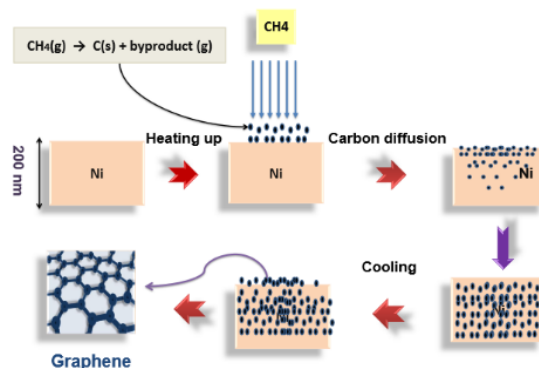
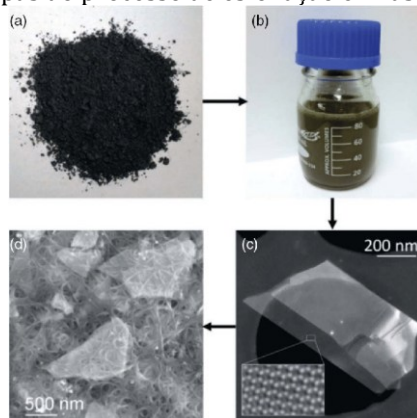


Figura 2 - Representação esquemática do processo de obtenção do grafeno via CVD.
Fonte: Bridget Cunningham (2014).

Outro método amplamente utilizado é a esfoliação em fase líquida (Liquid Phase Exfoliation – LPE), que consiste na dispersão de partículas de grafite em solventes apropriados contendo estabilizantes, seguida da aplicação de energia mecânica por ultrassonicação ou cisalhamento. Esse processo promove a separação das camadas de grafeno, resultando em folhas isoladas com razoável controle de espessura e qualidade. Embora o LPE permita a produção em escala com custos reduzidos, os materiais obtidos apresentam maior variabilidade estrutural em comparação ao CVD.

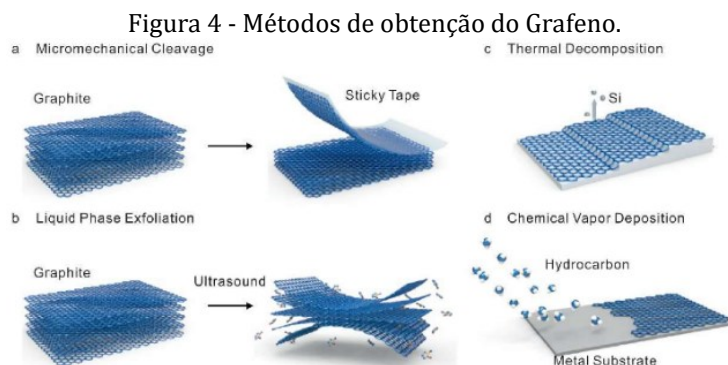
Figura 3 - Etapas do processo de esfoliação em fase líquida (LPE)



Fonte: Bo Guo (2018).

A esfoliação mecânica, apesar de pouco escalável, permanece relevante na pesquisa acadêmica devido à sua simplicidade e à alta qualidade do grafeno obtido. A técnica pode ser dividida em cunhagem micromecânica e cunhagem por abrasão, sendo a primeira realizada com auxílio de fitas adesivas para remover sucessivas camadas de grafite, até a obtenção de monocamadas. Este método foi o responsável pelo isolamento inicial do grafeno em 2004 por

Geim e Novoselov. Já a cunhagem mecânica utiliza ferramentas de precisão, como cunhas de diamante associadas a ondas ultrassônicas, para promover a separação física das camadas.



Fonte: Jin-Ho Lee, Soo-Jeong Park e Jeong-Woo Choi (2019).

Cabe destacar que outras rotas sintéticas continuam sendo objeto de intensa investigação, incluindo epitaxia em carbeto de silício (SiC), redução de óxido de grafeno (GO) e métodos híbridos. A recente descoberta do grafeno e seu impacto em múltiplas áreas da ciência têm motivado avanços significativos na engenharia de materiais, visando superar as limitações de escalabilidade, controle estrutural e integralidade industrial.

2.1. Bandas de energia e Cone de Dirac

A estrutura de bandas do grafeno, descrita por modelos de tight-binding, revela que as bandas de valência (π) e de condução (π^*) se encontram nos pontos de alta simetria K e K' da zona de Brillouin. Esses pontos são conhecidos como pontos de Dirac, onde ocorre a formação do cone de Dirac. A relação de dispersão próxima aos pontos de Dirac é notavelmente linear, o que distingue o grafeno de semicondutores convencionais, cuja dispersão é parabólica. Essa linearidade é expressa por:

$$E(k) = \hbar \cdot v_F \cdot |k - K| \quad (\text{equação 1})$$

onde:

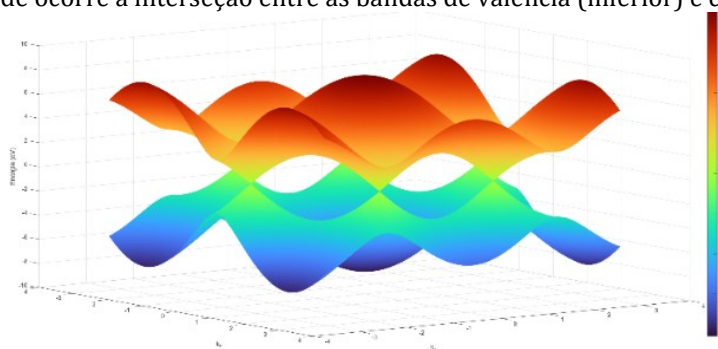
- $v_F \approx 10^6 \text{ m/s}$ é a velocidade de Fermi.

Essa dispersão linear faz com que os portadores de carga (elétrons e buracos) tenham massa efetiva nula, comportando-se como férmions relativísticos bidimensionais, ou seja, os elétrons próximos aos pontos de Dirac se comportam como partículas sem massa, e a relação momento-energia deles passa a ser linear como na equação de Dirac 2D. Essa singularidade é o que dá ao grafeno suas distintas propriedades elétricas, altíssima condutividade e mobilidade eletrônica e a ocorrência de efeitos quânticos raros, como o efeito Hall quântico, que diferente

de outros materiais que necessitam de baixas temperaturas, nele pode ocorrer em temperaturas ambientes.

Na Figura 5, é apresentada a estrutura de bandas eletrônicas do grafeno obtida por meio do modelo de ligação forte (tight-binding). Observa-se a presença dos pontos de Dirac, localizados nas interseções entre as bandas de valência (inferior) e condução (superior), caracterizando a ausência de bandgap. A dispersão linear ao redor desses pontos evidencia o comportamento relativístico dos portadores de carga, responsáveis pelas propriedades eletrônicas singulares do material.

Figura 5 - Estrutura de bandas eletrônicas do grafeno calculada pelo modelo tight-binding, evidenciando os pontos de Dirac onde ocorre a interseção entre as bandas de valência (inferior) e condução (superior).



Fonte: Autoria Própria

2.2. Transporte Balístico e Efeito de Klein

O grafeno devido à sua estrutura altamente ordenada e bidimensional, permite o regime de transporte balístico, no qual elétrons percorrem longas distâncias sem espalhamento significativo por impurezas ou fônons. Em amostras de alta qualidade, a mobilidade eletrônica pode ultrapassar $3 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, com comprimentos de livre percurso superiores a $25 \mu\text{m}$ mesmo à temperatura ambiente, que são valores muito superiores aos observados em semicondutores tradicionais, como o silício. Nesse regime, a condução elétrica deixa de obedecer à Lei de Ohm clássica e passa a ser descrita por modelos quânticos, como o de Landauer-Büttiker, nos quais a condutância é quantizada conforme o número de canais de transporte disponíveis.

Outro fenômeno notável associado aos férmions de Dirac presentes no grafeno é o efeito de Klein, que permite a travessia de elétrons por barreiras de potencial mesmo com energia inferior à altura da barreira, sem reflexão. Isso ocorre devido à conservação do pseudospin e à ausência de massa efetiva dos portadores. Esse efeito foi demonstrado experimentalmente em 2009, em heteroestruturas de grafeno, e representa a base para dispositivos inovadores de óptica eletrônica, como colimadores e transistores baseados em filtragem angular.

2.3. Efeito Hall Quântico

O Grafeno possui uma variação incomum do efeito Hall Quântico, em baixas temperaturas e campos magnéticos intensos (acima de 10 Tesla), seus portadores de carga descrevem níveis de Landau quantizados, mas diferente de outros materiais, devido a natureza dos férmions de Dirac, ele se quantiza de uma forma única:

$$\sigma_{xy} = \pm 4 \left(n + \frac{1}{2} \right) \left(\frac{e^2}{h} \right) \quad (\text{equação 2})$$

Essa expressão nos indica que o fator de preenchimento ν assume valores semi-inteiros e múltiplos de 4:

$$\nu = \pm 2, \pm 6, \pm 10, \dots$$

Essa quantização incomum vem de duas características do grafeno: A dispersão linear $E(k)$ dos portadores e a degenerescência dupla dos níveis de Landau $n = 0$, duas do spin eletrônico, e duas dos vales de Dirac (K e K'). A figura 8 compara o efeito Hall quântico em 3 sistemas, (a) elétron livre, (b) grafeno bicamada e (c) grafeno monocamada, no elétron livre os níveis são igualmente espaçados e refletem a estrutura parabólica clássica, e nos modelos com grafenos temos a geometria anômala do material, uma delas sendo a relação quântica relativista do grafeno monocamada.

3. APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS DO GRAFENO E TMDCs

Todas as propriedades citadas do grafeno na seção anterior o destacam como um material chave para aplicação em dispositivos eletrônicos avançados, em conjunto com os dicalcogenetos de metais de transição (TMDCs) como MoS₂, ele forma a base de uma nova geração de tecnologias além do silício tradicional. Transistores de efeito de campo (FET) baseados em grafeno apresentam um desempenho excelente em altas frequências, mesmo com a ausência de bandgap, pesquisadores tem desenvolvido estruturas híbridas com os TMDCs combinando a alta condutividade do grafeno com as propriedades semicondutoras desses materiais.

Essa combinação de materiais junta a condutividade e transparência do grafeno com a seletividade espectral e sensibilidade ótica dos TMDCs, sendo especialmente útil em sensores, já que o grafeno já possui uma alta sensibilidade a cargas elétricas e mudanças de ambiente químico, enquanto os TMDCs ampliam essas capacidades possibilitando o ajuste fino dos sensores, de forma a possibilitar a criação de sensores extremamente precisos e miniaturizados.

3.1. Transistores de Alta Frequência

Uma das áreas de pesquisa de grande interesse relacionada ao grafeno se trata dos transistores de alta frequência, já que possui altíssima mobilidade eletrônica (até $2 \times 10^5 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$), o que permite frequências de corte de até 300 GHz, ele apresenta um grande potencial para futuras aplicações na área de telecomunicações, como radiofrequência (RF). Mesmo que o grafeno necessite dos dialcogenetos de metais de transição para obter uma bandgap, ainda assim, sua combinação se torna um excelente dispositivo de chaveamento sendo capaz de excelente modulação de corrente podendo ter razões on/off até mesmo acima de 10^8 em monocamadas.

Diversos avanços relevantes já foram alcançados nessa área de pesquisa, como por exemplo a IBM que produziu GFETs (transistor de efeito de campo baseado em grafeno) com frequência de corte de até 100 GHz, ou a Samsung que em 2014 apresentou transistores de grafeno flexíveis integrados em circuitos impressos, esses avanços ilustram o potencial do grafeno na criação de uma nova geração avançada de dispositivos eletrônicos de alta performance.

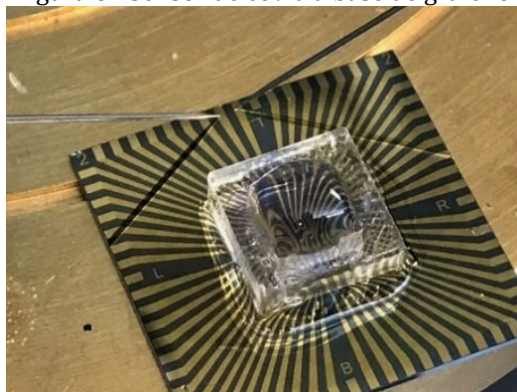
3.2. Sensores químicos

Entre as aplicações mais promissoras do grafeno, destaca-se seu uso em sensores químicos e biológicos. Sua espessura atômica, aliada à elevada área superficial e condutividade elétrica, permite detectar variações mínimas de carga ou adsorção de moléculas na superfície. Essas características conferem ao material sensibilidade excepcional, mesmo diante de baixíssimas concentrações de analitos.

A funcionalização da superfície do grafeno, bem como sua combinação com TMDCs, potencializa a seletividade química dos sensores, permitindo o ajuste de sua resposta a diferentes alvos moleculares. Dispositivos híbridos já demonstraram desempenho eficaz na detecção seletiva de gases como NO_2 , NH_3 , CO e H_2 .

Um exemplo marcante do uso do grafeno na área biomédica foi apresentado em 2019, quando pesquisadores norte-americanos desenvolveram um sensor baseado no material capaz de identificar o vírus da COVID-19 em amostras de saliva em apenas 10 segundos. Além da velocidade, o dispositivo demonstrou alta sensibilidade, mesmo em concentrações muito baixas, evidenciando o potencial do grafeno em diagnósticos rápidos e portáteis.

Figura 6 - Sensor de covid à base de grafeno.



Fonte: Galileu (2023).

3.3. Eletrônica Flexível

A combinação singular de propriedades do grafeno e de outros materiais bidimensionais como alta condutividade elétrica, transparência óptica ($\approx 97,7\%$) e flexibilidade mecânica tem impulsionado significativamente o avanço da eletrônica flexível. Esses materiais permitem a fabricação de sistemas leves, dobráveis, transparentes e com excelente desempenho elétrico, tornando-se alternativas promissoras aos materiais tradicionais, como o óxido de índio-estanho (ITO).

Nesse contexto, o grafeno tem sido amplamente investigado como eletrodo transparente e flexível em tecnologias de visualização, iluminação e circuitos integrados de nova geração. Entre as aplicações mais relevantes, ver Tabela 1, destacam-se:

Tabela 1 - Aplicações do Grafeno em Eletrônica Flexível.

Aplicação	Descrição	Benefício Técnico
Telas OLED e e-paper dobráveis	Grafeno como camada condutora transparente em displays ultrafinos	Resistência à fratura e maior durabilidade que o ITO
Circuitos eletrônicos flexíveis	Integração de grafeno e TMDCs com substratos como PET ou PEN	Viabiliza circuitos em superfícies curvas ou dobráveis
Eletrodos condutores transparentes	Estabilidade após até 5.000 ciclos de dobra em testes mecânicos	Alta confiabilidade mecânica e elétrica

Fonte: Autoria Própria.

3.4. Aplicações em Memórias e Dispositivos Lógicos

O uso de Grafeno com TMDCs tem impulsionado a indústria de memórias e dispositivos lógicos, uma das tecnologias que o grafeno atuou como um avanço tecnológico foi a de Memórias Resistivas de Acesso Aleatório (ReRAM), memórias desse tipo utilizam 2 eletrodos metálicos (como por exemplo o Grafeno) separados por um isolante, e ao aplicar-se uma tensão, ocorre ou formação ou ruptura de filamentos condutivos dentro do material, o que varia sua

resistência, com base na resistência desses filamentos os dados salvos são interpretados (resistência baixa = bit 1, resistência alta = bit 0), memórias ReRAM feitas com grafeno e TMDs são extremamente rápidas e podem ser fabricadas em tamanhos menores devido às características desses materiais, se tornando mais eficientes até mesmo em consumo de energia.

Um dos exemplos de avanços nessa área ocorreu no Brasil, onde a pesquisadora da USP Marina Sparvoli liderou com outros pesquisadores a criação de um memristor constituído de uma camada de grafeno depositada entre contatos de ITON (óxido de índio-estanho dopado com nitrogênio) e de alumínio, dependendo da tensão aplicada no dispositivo forma-se o filamento responsável pela memória, a principal vantagem desse tipo de dispositivo é que mesmo após desligado de forma repentina ele não perde os dados salvos, outra vantagem é sua aplicabilidade em tamanho reduzido, que agora com o uso do grafeno se tornou ainda mais eficaz, os testes do protótipo demonstraram uma velocidade até 100 vezes mais rápida que as memórias flash atuais.

Um dos avanços mais recentes na indústria de computadores foi a criação de uma nova memória RAM por pesquisadores da universidade de Fudan, em Xangai, na China, a memória utiliza um novo tipo de tecnologia chamada PoX (Phase-change Oxide), e uma das características inovadoras adicionadas foi a substituição do silício pelo grafeno, o que permitiu velocidades extremamente rápidas de operação, a memória é capaz de realizar operações de escrita em 400 picossegundos, além disso ela possui uma memória não-volátil, ou seja, ao ser desligada nenhuma informação é perdida, representando um possível marco para as tecnologias mais atuais como IAs ou até mesmo a indústria de jogos que necessita de alta performance, a empresa já foi capaz de produzir dispositivos em menor escala e os testes dessa versão foram promissores, esses avanços podem representar uma melhoria significativa nas tecnologias de memórias no futuro.

3.5. Comparação com Silício e Outros Materiais Tradicionais:

Tabela 2 - Comparação do Grafeno com o Silício e outros Materiais Tradicionais.

Propriedade	Grafeno	Silício	ITO
Mobilidade eletrônica (cm ² /V·s)	~200.000 (ideal) / ~15.000 (em SiO ₂)	~1.400 (elétrons) / ~450 (lacunas)	Média: ~40-60
Bandgap	0 eV	~1,1 eV	~3,5-4,3 eV
Condutividade elétrica (S/m)	~10 ⁶	~10 ⁴	~10 ⁵
Transparência óptica (%)	~97,7% (monocamada)	Baixa	Alta (~90%)
Flexibilidade mecânica	Alta	Baixa	Baixa

Fonte: Autoria Própria.

4. DESAFIOS E CAMINHOS PARA VIABILIZAÇÃO INDUSTRIAL

Embora o Grafeno possua excelentes propriedades elétricas e mecânicas, que até mesmo superam os materiais mais utilizados hoje em dia na maioria dos dispositivos eletrônicos, ele ainda enfrenta diversos obstáculos para que sua industrialização em larga escala passe a ser uma realidade.

Um dos principais desafios para comercialização do Grafeno, é a sua produção em larga escala, embora existam diversas maneiras de obtê-lo, todas tem suas vantagens e desvantagens, algumas delas serão apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3: Métodos de obtenção do Grafeno.

Método	Vantagem	Desvantagem	Uso mais comum
Esfoliação Mecânica	Simplicidade, elevada qualidade estrutural e eletrônica	Delicado, demorado e baixo rendimento.	Pesquisa fundamental.
Esfoliação em fase líquida	Simples, Direto e produção em larga escala	Demorado e impuro	Dispositivos eletrônicos.
CVD	Produção em larga escala, excelente qualidade	Complexidade e custo elevado	Pesquisa básica e eletrônicos a base de grafeno.

Fonte: Autoria Própria.

Apesar dos 3 métodos listados estarem entre os mais comuns, suas desvantagens impedem a produção em larga escala se comparado com o silício, que domina o mercado atualmente, porém existem diversas pesquisas que visam a melhoria dos processos de produção do grafeno, um exemplo é o uso de IA preditiva no auxílio do processo de deposição química a vapor (CVD). Além disso, os processos atuais para obtenção do grafeno se diferem muito dos mais usados na indústria, e em sua maioria, o transporte do grafeno para outros substratos é uma tarefa especialmente difícil, pois o material pode se degradar ou perder propriedades elétricas facilmente, além de que a sua integração com outros materiais é limitada, pois apesar de ser um excelente condutor, pode facilmente ser contaminado e perder boa parte de suas vantagens.

Outro obstáculo envolve as aplicações do grafeno, a falta de um bandgap torna difícil a produção de transistores à base de grafeno, o que já foi contornado na produção de GFETs e transistores baseados no efeito de Klein, os transistores a base de grafeno demonstraram mobilidade até 10 vezes maiores que os transistores de silício.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou as propriedades elétricas do grafeno, destacando sua alta mobilidade eletrônica, condutividade excepcional e efeitos quânticos únicos, como o transporte balístico e o efeito Hall quântico anômalo. Tais características posicionam o grafeno como um material-chave para a inovação em dispositivos eletrônicos, especialmente em aplicações que exigem alta velocidade, sensibilidade e flexibilidade. Comparações com materiais tradicionais, como silício e ITO, bem como a análise de alternativas como os TMDCs, mostraram que os materiais bidimensionais oferecem vantagens específicas, embora enfrentem desafios técnicos consideráveis. Entre os principais entraves estão a ausência de bandgap no grafeno, a dificuldade de síntese em larga escala e a integração com processos industriais convencionais. Apesar disso, os avanços em engenharia de materiais, inteligência computacional e técnicas de fabricação sugerem um cenário promissor. À medida que barreiras tecnológicas forem superadas, é esperado que o grafeno e os TMDCs desempenhem um papel central em áreas estratégicas como biossensores e computação de alto desempenho, contribuindo para a construção de uma indústria eletrônica mais eficiente, flexível e sustentável.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seu agradecimento ao professor Weverson dos Santos Cirino, pela orientação e apoio prestado durante o desenvolvimento deste trabalho, bem como pelas contribuições fundamentais para a consolidação dos conceitos abordados.

Agradecem, igualmente, à Universidade do Estado do Amazonas (UEA) e à Escola Superior de Tecnologia (EST) pelo suporte institucional, infraestrutura e ambiente propício à pesquisa acadêmica. Por fim, reconhecem o apoio imprescindível de suas famílias, cujo incentivo e compreensão foram essenciais ao longo da trajetória de elaboração deste artigo.

REFERÊNCIAS

- BISCHOFF, D.; VARLET, A.; SIMONET, P.; EICH, M.; OVERWEG, H. C.; IHN, T.; ENSSLIN, K. Localized charge carriers in graphene nanodevices. *Applied Physics Reviews*, v. 2, n. 3, set. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281942770_Localized_charge_carriers_in_graphene_nanodevices. Acesso em: 10 jun. 2025.
- CASTRO NETO, A. H.; GUINEA, F.; PERES, N. M. R.; NOVOSELOV, K. S.; GEIM, A. K. The electronic properties of graphene. *Reviews of Modern Physics*, v. 81, n. 1, p. 109 – 162, jan. 2009. Disponível em: <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.81.109>. Acesso em: 10 jun. 2025.

CUNNINGHAM, Bridget. Synthesizing Graphene with Chemical Vapor Deposition. COMSOL Blog, 6 nov. 2014. Disponível em: <https://www.comsol.com/blogs/synthesizing-graphene-chemical-vapor-deposition>. Acesso em: 12 jun. 2025.

GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. The rise of graphene. Nature Materials, v. 6, n. 3, p. 183 – 191, mar. 2007. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nmat1849>. Acesso em: 12 jun. 2025.

GUO, B. 2D noncarbon materials-based nonlinear optical devices for ultrafast photonics [Invited]. Chinese Optics Letters, v. 16, p. 020004, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/322628375_2D_noncarbon_materials-based_nonlinear_optical_devices_for_ultrafast_photonics_Invited. Acesso em: 14 jun. 2025.

LEE, Jin-Ho; PARK, Soo-Jeong; CHOI, Jeong-Woo. Electrical Property of Graphene and Its Application to Electrochemical Biosensing. Nanomaterials, v. 9, n. 2, p. 297, fev. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-4991/9/2/297>. Acesso em: 07 jun. 2025.

MORDOR INTELLIGENCE. Graphene Market – Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2025–2030). 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/graphene-market>. Acesso em: 09 jun. 2025.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE ISOLADORES ELÉTRICOS APLICADOS EM SUBESTAÇÕES DE MÉDIA E BAIXA TENSÃO

DOI: 10.51859/amplla.wme212.1125-2

Carla Vitória Ribeiro Oliveira ¹

Matheus Filipe Ferreira do Carmo ²

Daniel Deyvison Pinheiro Batista ³

Weverson dos Santos Cirino ⁴

¹ Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Mar da Galileia, n 05, Conjunto Galileia 1, Cidade Nova, CEP: 69090-665

Manaus, AM, Brasil, E-mail: cvro.eng22@uea.edu.br

² Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua São Jorge, n° 121, Santa Luzia, CEP: 69074-490

Manaus, AM, Brasil, E-mail: mffdc.eng22@uea.edu.br

³ Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Olegário Mariano n° 295, Vila Marinho, CEP: 69036735

Manaus, AM, Brasil, E-mail: ddpb.eng22@uea.edu.br

⁴ Professor Efetivo do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Rio Umatumã, n 312, Conjunto Colina do Aleixo, Bairro São José Operário I, CEP: 69085-286

Manaus, AM, Brasil, E-mail: wdsantos@uea.edu.br

Resumo: Este trabalho pretende apresentar uma revisão bibliográfica da relação entre os isoladores do sistema elétrico e as condições ambientais que influenciam a sua escolha e desempenho. Existe uma diversidade de isoladores em diferentes materiais, podendo uma classe como os cerâmicos, ter modificações na sua composição para atender a requisitos específicos. Cada região do país possui particularidades ambientais que exigem a prevalência de um isolador com material, tamanho e geometria específica para que haja o pleno funcionamento do sistema elétrico. Além disso, o estudo abordou a possibilidade de casos de falhas associadas à escolha equivocada e à manutenção ineficaz, justificando a necessidade de seguir os critérios técnicos estabelecidos.

Palavras-chave: Isolador; condições ambientais; sistema elétrico; material.

Abstract: This paper aims to present a literature review on the relationship between electrical system insulators and the environmental conditions that influence their selection and performance. There is a variety of insulators made from different materials, and classes such as ceramics may have compositional modifications to meet specific operational requirements. Each region of the country has unique environmental characteristics that demand insulators with specific materials, sizes, and geometries to ensure the reliable functioning of the electrical system. Additionally, the study addresses failures associated with improper selection and inadequate maintenance, emphasizing the importance of adhering to established technical standards.

Keywords: Insulator; environmental conditions; electrical system; material.

1. INTRODUÇÃO

Quando se trata de linhas de transmissão de energia elétrica, o maior foco é dado para tensão elétrica, contudo, é a corrente elétrica que representa um dos maiores riscos e que exige alto grau de atenção e precisão.

É a corrente elétrica que cria o fluxo de energia circulante nos condutores, sendo o fator determinante na potência e eficiência de uma linha de transmissão. Um balanceamento

incorreto pode causar danos e sobrecarga nos condutores, a sobrecarga gera: superaquecimento, que se elevado, resulta em explosão ou incêndio, gera a queima desses componentes além da corrente de fuga, que em contato com as estruturas metálicas, como torre, representa elevado risco de choques elétricos em trabalhadores.

Um dos principais aliados para evitar danos aos equipamentos, acidentes e interrupções no fornecimento de energia, são os isoladores elétricos.

Em linhas de média tensão os isoladores são instalados em conjunto, com variações em quantidade, material, distribuição, espaçamento e os pontos de instalação. Todos esses aspectos são orientados por fatores, como: a tensão na linha, a distância entre torres de transmissão, o tipo de condutor e condições ambientais do local, como temperatura, poluição, salinidade, umidade e etc são fatores que influenciam diretamente o material dos isoladores, visto que cada material interage molecularmente de maneira diferente a cada condição.

Por isso, isoladores adequados são essenciais para manter e garantir um bom desempenho, durabilidade e segurança do sistema.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Sistema Elétrico de Potência Brasileiro

O sistema elétrico de potência do Brasil é uma rede complexa que garante a chegada da energia até os centros de consumo, dividida em geração, transmissão e distribuição. Na geração, as usinas convertem diversas fontes de energia, como hidráulica, eólica e solar fotovoltaica, em eletricidade.

Uma vez gerada, essa energia é transportada por longas distâncias através da transmissão, utilizando linhas de alta tensão para evitar perdas significativas. Durante esse transporte, os isoladores elétricos são fundamentais, pois evitam fugas de corrente e garantem a segurança e o bom funcionamento das linhas.

Ao se aproximar das cidades e indústrias, a distribuição, etapa essencial para reduzir a tensão e entregar a energia de forma segura e eficiente a todos os consumidores. As subestações são peças-chave na distribuição. Elas não só transformam os níveis de tensão para adequar a energia ao consumo local, mas também garantem a proteção, o controle e a qualidade do fornecimento. Além disso, contam com diversos equipamentos, entre eles os isoladores, que são indispensáveis para suportar mecanicamente os condutores e isolar eletricamente as partes energizadas da estrutura metálica, evitando curtos e acidentes, tendo em vista que, as subestações de média tensão recebem a energia das linhas de transmissão, geralmente acima

de 69 kV e a regulam para níveis entre 1 kV e 34,5 kV, conectando diversos pontos da rede de distribuição de uma cidade. Já as subestações de baixa tensão recebem níveis de média tensão, por exemplo, 13,8 kV, e a reduzem para níveis inferiores a 1 kV, ideais para alimentar diretamente residências e estabelecimentos comerciais. Subestações de média e baixa tensão podem ser externas ou abrigadas, dependendo da área, do espaço e da necessidade de proteção. Seja na geração, transmissão ou distribuição, os isoladores estão sempre presentes, garantindo que a energia percorra todo o caminho até o consumidor com segurança, eficiência e confiabilidade.

2.2. Isoladores Elétricos

Os isoladores elétricos desempenham um papel fundamental no projeto e na operação de subestações de média tensão, sendo componentes essenciais tanto do ponto de vista elétrico quanto mecânico. Sua principal função é garantir o isolamento elétrico entre os condutores energizados e as estruturas metálicas de suporte, bem como entre os próprios condutores, prevenindo assim curtos-circuitos e a ocorrência de arcos elétricos que podem comprometer a segurança e a confiabilidade do sistema.

Além da função de isolamento, os isoladores também têm a importante tarefa de fornecer suporte mecânico aos condutores e barramentos, resistindo às forças eletromecânicas e ambientais, como vibrações, ventos, peso dos cabos e variações térmicas. Eles devem ser projetados para suportar tensões elétricas elevadas, bem como esforços mecânicos significativos, sem comprometer sua integridade ou desempenho.

Os materiais mais comuns utilizados na fabricação de isoladores incluem porcelana, vidro temperado e polímeros compostos, sendo escolhidos de acordo com as exigências do projeto, as condições ambientais. A seleção adequada do tipo de isolador é crucial para garantir a durabilidade e eficiência da subestação. Os principais tipos de isoladores utilizados em subestações de média tensão, são:

- Isolador Pedestal;
- Isolador tipo bucha;
- Isolador Pino;
- Isolador Pilar;
- Isolador de Disco;
- Bucha de Passagem;

2.3. Materiais Usados na fabricação de Isoladores

2.3.1. Vidro

Feito com vidro temperado, ao final da sua produção passa por um tratamento térmico, onde é aquecido em temperaturas severamente altas e rapidamente resfriado, isso resulta em uma pressão interna causada pela camada mais superficial do componente, o que lhe confere mais resistência a choques térmicos e a radiação ultravioleta, possuem uma rigidez dielétrica superior, em contrapartida não são resistentes a choques mecânicos intensos. Por conta do seu material é mais resistente ao clima e a poluição. Esse tipo de isolador é amplamente utilizado como suporte mecânico nas torres. Porém apesar da sua resistência, quanto maior a temperatura a qual está submetido maior é a sua perda dielétrica.

2.3.2. Cerâmica

É usada porcelana, quartzo, feldspato, caulim ou argila, podem ser adicionados outros elementos na sua composição que a depender da porcentagem podem alterar algumas propriedades, deve ter seu corpo compacto e de composição homogênea, sendo assim na sua fabricação é imprescindível que não haja bolhas de ar e nem impurezas no material, elas comprometem a sua rigidez dielétrica. Por mais que a estrutura do isolador se densifique durante a queima, ainda assim a porcelana apresenta poros microscópicos em sua superfície e para torná-la impermeável é feito um processo de vitrificação, onde é adicionada uma camada de esmalte vítreo na sua queima final, garantindo assim a sua resistência a umidade. Esse material apresenta uma resistência elétrica satisfatória, grande durabilidade e resistência à compressão, porém são sensíveis à quebra por impactos superficiais e acumulam água e contaminantes com maior facilidade devido ao material mineral.

2.3.3. Polímero

Também conhecidos como isoladores compósitos, são materiais com características dielétricas significativas e de manipulação facilitada em comparação aos outros, sendo mais ductíveis, maleáveis e menos densos. Esse tipo de isolador tem um tempo de fabricação menor. Ele é composto por uma haste de fibra de vidro reforçada por um polímero, seja ele silicone, epóxi, vinil ou outro material. Outro ponto positivo ao seu favor é que esse tipo de isolador é resistente a impactos mecânicos e alguns materiais têm a capacidade de recuperar a sua hidrofobicidade.

3. NORMAS TÉCNICAS E REGULAMENTAÇÕES

3.1. Normas aplicáveis

- NBR 5032 – Isoladores de cerâmica e vidro.
- NBR 5034 - Buchas para tensões alternadas superiores a 1kV.
- NBR 10624 – Isoladores poliméricos.
- IEC 672 – Normas internacionais para materiais cerâmicos.
- CB-009:013.01 (ou CB-09/013) – Comissão de Estudo de Isoladores (verificar com a ABNT).
- Normas do ONS e da ANEEL sobre construção e operação de subestações.
- IEC 60815-1. Seleção e dimensionamento de isoladores de alta tensão destinados à utilização em condições poluídas

3.2. Fatores Ambientais e Critérios normativos para diferentes regiões brasileiras

Fatores climáticos como temperatura, umidade, salinidade, chuvas e incidência solar, além da localização geográfica, têm grande influência na escolha dos isoladores, especialmente no que se trata do material e geometria. Esses elementos devem ser compatíveis com o campo elétrico esperado, a tensão aplicada e as condições ambientais do local de instalação. A norma IEC 60815 estabelece critérios ambientais por classe de poluição:

- Classe I: Nível baixo
- Classe II: Nível médio
- Classe III: Nível Alto
- Classe IV: Nível muito alto

Para ambientes classificados nas classes III e IV, as normas exigem isoladores com maior distância de escoamento, que é a distância ao longo da superfície isolante entre partes energizadas e aterradas. Esse aumento visa reduzir a possibilidade de formação de trilhas condutivas causadas por acúmulo de contaminantes e umidade. Por exemplo, em regiões classificadas como classe IV, tipicamente litorâneas, a recomendação é que a distância de escoamento seja superior a 50 mm/kV, dependendo do nível de tensão.

Em regiões litorâneas, a salinidade é um dos principais desafios. A deposição de sais na superfície dos isoladores aumenta a condutividade superficial, elevando o risco de arcos elétricos e falhas. Para mitigar esse risco, as normas orientam a utilização de isoladores poliméricos com características hidrofóbicas, que possuem capacidade de repelir a umidade e

evitar a formação de filmes condutivos. Além disso, são recomendadas medidas complementares, como a realização periódica de lavagens dos isoladores e, em alguns casos, a aplicação de revestimentos hidrofóbicos à base de silicone (RTV).

Nas regiões com alta incidência de descargas atmosféricas, os isoladores estão sujeitos a esforços elétricos transitórios extremamente elevados. Nesses locais, é fundamental que os isoladores possuam elevada rigidez dielétrica, ou seja, capacidade de suportar sobretensões provocadas por raios. As normas recomendam o uso de para-raios de distribuição em conjunto com os isoladores, além de preverem o emprego de anéis corona ou blindagens metálicas que ajudam na uniformização do campo elétrico, minimizando o risco de centelhamentos.

4. ESTUDO REGIONAL E CONDIÇÕES AMBIENTAIS

4.1. Divisão do Brasil por zonas climáticas

Por conta da sua posição geográfica, o Brasil é um país tropical, o que lhe atribui características marcantes. O clima do País pode ser dividido em zonas climáticas características, sendo elas:

Tabela 1 - Zonas climáticas e isoladores.

Zona Climática	Condição de risco	Impacto no isolador
Equatorial	Alta umidade, temperaturas altas, chuvas fortes.	Corrente de fuga, descargas parciais, biofilmes.
Tropical	Verão úmido, inverno seco, poluição e poeira.	Película condutora, perda de hidrofobicidade.
Tropical Ameno	Temperaturas baixas, altitude elevada.	Risco de trincas por fadiga térmica e degradação.
Tropical Atlântico	Temperatura alta, chuva, alta umidade e salinidade.	Corrente de fuga e corrosão metálica.
Semiárido	Clima quente, alta umidade, poeira e sais no solo.	Película condutora, degradação por exposição UV.
Subtropical	Temperaturas baixas, geadas e baixa evapotranspiração.	Trincas por contração térmica, perda de desempenho.
Temperado	Temperatura baixa, geadas, precipitação mediana, baixa evapotranspiração.	Trincas por choque térmico e película condutora.

Fonte: (IEC 60815-1, 2008).

4.2. Influência dos fatores ambientais nos Isoladores.

Os isoladores, não sendo estruturas metálicas, mas sim componentes feitos de materiais isolantes dotados de alta rigidez dielétrica, são os equipamentos mais vulneráveis do sistema elétrico, visto que devem resistir a tensão nominal, sobretensões em frequência industrial, ao vandalismo e as condições locais as quais ficam expostos de maneira permanente. Entre os fatores ambientais que mais prejudicam a integridade e o funcionamento dos isoladores elétricos estão a umidade e a poluição.

Sobre isso, podemos citar Darcy Ramalho Mello, que em sua publicação no XXIV SNPTEE em 2017, apontou que desligamentos em linhas de transmissão sem causa aparente ou conhecida, podem ser ocasionadas pela redução do desempenho dos isoladores, causada pela poluição e envelhecimento do material. Somando isso a afirmação (MELLO 2017, p. 2) “quando há poluição na superfície isolante que é umidificada por estes agentes, se tornando condutora, e iniciando um processo que pode vir a causar uma descarga disruptiva”.

Em relação aos isoladores de porcelana, a umidade do ar em contato com o material é absorvida, o que ocasiona a redução de sua rigidez dielétrica e por mais que ele possua uma camada vítrea, esse material pode ser resistente por um período, até por que o vidro é hidrofílico e qualquer trinca nesta camada protetora pode gerar o comprometimento elétrico da peça (MAMEDE FILHO, 2019).

Temperaturas elevadas também influenciam na redução da rigidez dielétrica, em específico “a partir dos 100°C, à frequência industrial, e de 180°C, sob tensão de impulso atmosférico, a rigidez dielétrica da porcelana cai vertiginosamente” (MAMEDE FILHO, 2019, p. 633).

Regiões com alto nível de salinidade podem apresentar alto risco de corrosão dos materiais dos isoladores, especificamente nos componentes metálicos e nas superfícies expostas dos isoladores. O que exige uma manutenção periódica rigorosa e a substituição antecipada do componente visando manter a confiabilidade do sistema.

No caso específico do estado do Amazonas, o clima equatorial predominante é caracterizado por altos índices de umidade relativa do ar (frequentemente acima de 80%), chuvas intensas e frequentes ao longo do ano, além de temperaturas médias elevadas. Esses fatores favorecem a formação de películas condutivas sobre a superfície dos isoladores, intensificando a ocorrência de correntes de fuga e descargas parciais. Além disso, o ciclo constante de molhamento e secagem pode acelerar a degradação por envelhecimento hidrotérmico, especialmente em isoladores poliméricos, se não forem devidamente especificados para essas condições. A combinação entre a umidade elevada e a presença de poluentes biológicos ou minerais naturais na atmosfera contribui para a formação de camadas contaminantes que aumentam o risco de arcos elétricos.

5. AVALIAÇÃO TÉCNICA DE SUBESTAÇÕES DA REGIÃO

Foi realizada uma visita técnica à subestação de energia da Escola Superior de Tecnologia (UEA). A subestação, do tipo abrigada, apresenta uma variedade significativa de

isoladores aplicados em diferentes funções, o que permitiu uma análise prática das três principais categorias de isoladores elétricos.

Durante a visita, foi possível identificar: Buchas de passagem para interior, isoladores de pedestal fabricados em porcelana, epóxi e quartzolítico, isoladores de acoplamento no transformador.

Além da identificação dos materiais, também foi possível observar as cores dos isoladores conforme a norma NBR 11790, que padroniza a coloração de acordo com a aplicação e material.

Todos os componentes da subestação são dimensionados para operar em 15 kV, estando dentro da margem de segurança, visto que a tensão de entrada na subestação é de 13,8 kV.

Figura 1 - Isoladores de porcelana e poliméricos tipo pedestal.



Fonte: Os próprios autores.

Figura 2 - Bucha de passagem com isolador cerâmico.



Fonte: Os próprios autores.

6. CAMPO ELÉTRICO E ISOLAMENTO

Em subestações de média, baixa ou alta tensão os equipamentos, cabos e isoladores devem ficar a uma distância e altura estabelecida por norma.

Quando uma tensão é aplicada em um condutor, ela interage com o seu material e com o ar ao redor. No condutor essa tensão tem força o suficiente para interferir na rigidez dielétrica do ar até um certo alcance, o que é definido como campo elétrico e sendo o ar um isolante natural, ele suporta até certo limite do campo elétrico antes de se tornar um condutor e ser ionizado causando descargas elétricas que danificam o sistema e prejudicam a sua eficiência.

Em subestações de média tensão, condutores energizados ao mesmo tempo geram campos elétricos que se sobrepõem, contudo, essa superposição é inviabilizada pela presença dos isoladores elétricos, que atuam como barreiras dielétricas em pontos estipulados para garantir a separação entre eles. Evitando a ocorrência de descargas, efeito corona e arco elétrico.

Contudo, o espaçamento entre os isoladores pode ser alterado por questões como o material utilizado, o qual deve ser adequado para as condições climáticas e ambientais do local que afetam diretamente a rigidez dielétrica do ar e as dimensões do componente.

7. RISCOS E CONSEQUÊNCIAS DO USO INDEVIDO

A utilização inadequada de isoladores em subestações de média tensão pode acarretar falhas catastróficas que ultrapassam a substituição de um componente. Estudos mostram que falhas estruturais e elétricas em isoladores decorrem, em muitos casos, de negligência quanto à especificação técnica, obsolescência dos materiais utilizados ou ausência de dispositivos de proteção contra fenômenos elétricos de alta intensidade.

O efeito corona, uma descarga luminosa visível, que ocorre quando o gradiente do potencial na superfície do condutor ultrapassa o gradiente crítico de ruptura do ar, essa descarga parcial pode ao longo do tempo pode degradar e corroer a superfície do isolador, podendo ser agravado dependendo do material, isso diminui a sua resistência dielétrica.

E quando o campo elétrico excede o limite do meio isolante, ocorre a descarga disruptiva, uma ruptura total do meio isolante, a intensidade dessa tensão disruptiva depende de fatores como: a pressão do ar no local, a umidade, a presença de vapor de água, o material do isolador, a tensão aplicada no condutor e a intensidade do próprio campo elétrico. Ela tem efeito imediato no isolador, resultando em trincos, rachaduras, queima ou até explosões do componente.

Esses efeitos podem se dar pela escolha de um isolador de material inadequado às condições, mas também pode ocorrer em um isolador de material adequado e perfeitamente dimensionado, isso por conta da manutenção inadequada. Ambientes com alta salinidade,

muita umidade, altos níveis de poluição ou com alto grau de incidência de descargas atmosféricas pode levar ao rompimento do isolamento.

Em uma falha de projeto construtivo desatualizado podem ocorrer estes efeitos, se o isolador não apresentar um componente como anel de vidro ou “pino grávido”, elementos característicos de modelos anti-corona e atuam na mitigação de descargas parciais e concentração de campo elétrico, sendo determinantes para o aumento da durabilidade do equipamento. A ausência desses dispositivos torna o isolador mais vulnerável à ação corrosiva localizada.

Como consequência pode haver falhas, como desligamento das linhas de transmissão e comprometer o fornecimento do sistema, em subestações de média tensão, essa vulnerabilidade pode ter impacto mais crítico, considerando a menor redundância típica.

Portanto, o uso indevido ou a negligência quanto à atualização e manutenção preventiva de isoladores representam riscos reais de interrupções no serviço, danos a equipamentos adjacentes, e comprometimento da segurança operacional da instalação.

8. CONCLUSÃO

O artigo reforça a importância da escolha adequada dos isoladores em subestações de média e baixa tensão, considerando fatores ambientais, materiais e normas técnicas. A partir deste estudo foram destacados os efeitos do clima, como a umidade, salinidade e poluição que degradam os materiais e reduzem a rigidez dielétrica. A realização de medidas preventivas e manutenções adequadas para a redução de acidentes. Além de demonstrar normas técnicas para assegurar o funcionamento seguro da rede elétrica de uma subestação.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao nosso professor Weverson dos Santos, pela orientação, paciência e incentivo no desenvolvimento do conteúdo.

REFERÊNCIAS

MELLO. Darcy Ramalho; GARCIA. Wesley S. Avaliação de Isoladores Naturalmente Poluídos retirados de Linhas de Transmissão. XXIV SNPTEE, 15 jun. 2021. Acesso em: 05 de maio de 2025.

SILVA. Cíntia Arantes; CAMPOS. Gustavo Lobato; SANTOS. Mariana Guimarães. Cálculo dos níveis de campos elétricos produzidos por linhas de transmissão operando em regime permanente. Disponível em: www.ifmg.edu.br/sic/edicoes-anteriores/resumos-2016/calculo-dos-niveis-de-campos-eletricos.pdf. Acesso em: 31 de maio de 2025.

PAGANOTTI, André L.; AFONSO, Márcio M.; SCHROEDER, Marco Aurélio. Cálculo e Minimização de Campos Elétricos de Linhas de Transmissão Trifásicas. Disponível em: www.sbmo.org.br/anais_momag/momag2012/artigos/98498_1.pdf. Acesso em: 31 de maio de 2025.

NOVAIS, Giuliano Tostes; MACHADO, Lilian Aline. OS CLIMAS DO BRASIL: Segundo a classificação climática de Novais. Revista Brasileira de Climatologia, Dourados, MS, v. 32, Jan. / Jun. 2023. Acesso em: 09 de junho de 25.

FUCHS, Rubens Dario. Transmissão de energia elétrica: Linhas Aéreas. Volume 1, 3ª edição, EDUFU, 2015.

YOSHIMURA, H. N.; GUEDES, S.; FREDECICCI, C. Dielétrico de vidro de elevada confiabilidade mecânica e termomecânica produzido por têmpera de dois estágios (têmpera térmica + troca iônica). Revista Matéria, Rio de Janeiro. V. 4, n. 2, p. 845- 860, Jul. 2009. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo1105>. Acesso em: 08 de junho de 2025

IEC 60815-1. Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles. Geneva: IEC, 2008.

MAMEDE FILHO, João. Manual de equipamentos elétricos /João Mamede Filho. - 4. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2013.

DEUTSCH, Nicolay M. Diferenças entre isoladores de porcelana e poliméricos. Projeto de diplomação. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016. Disponível em: . Acesso em: 14 de julho de 2025.

Capítulo 3

ESTUDO BIBLIOGRÁFICO SOBRE A EFICIÊNCIA DAS CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA

DOI: 10.51859/ampla.wme212.1125-3

Guilherme Gomes da Silva ¹
Jean Victor Lopes Mendes ²
Weverson dos Santos Cirino ³

¹ Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)
Rua Limão Doce, n 635, Bairro Gilberto Mestrinho, CEP: 69086-665
Manaus, AM, Brasil, E-mail: ggda.eng23@uea.edu.br

² Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)
Rua Franz Schubert n 840, Condomínio Ideal Flores, Bairro Flores, CEP: 69028-331
Manaus, AM, Brasil, E-mail: jvlm.eng21@uea.edu.br

³ Professor Efetivo do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)
Rua Rio Umatumã, n 312, Conjunto Colina do Aleixo, Bairro São José Operário I, CEP: 69085-286
Manaus, AM, Brasil, E-mail: wdsantos@uea.edu.br

Resumo: Nos últimos anos, a busca por fontes de energia limpa e sustentáveis tem colocado as células solares de perovskita em destaque no cenário da pesquisa. Este artigo apresenta um estudo bibliográfico sobre a eficiência dessas células, que vêm-se mostrando promissoras por combinarem alta capacidade de conversão de luz em eletricidade com um processo de fabricação mais simples e acessível quando comparamos as tecnologias concorrentes. Abordamos suas principais características como estrutura, propriedades fundamentais e os avanços que permitiram crescimentos na eficiência em pouco tempo, como também os desafios ainda enfrentados. A partir da pesquisa em diversos artigos sobre este assunto, discutimos o futuro promissor na área de geração de energia solar tendo em vista a utilização das células solares de perovskita.

Palavras-chaves: Perovskita; Células Solares; Eficiência; Energia Limpa; Fonte de Energia.

Abstract: In recent years, the search for clean and sustainable energy sources has put perovskite solar cells in the spotlight in the research scenario. This article presents a bibliographic study on the efficiency of these cells, which has shown promise by combining a high capacity for converting light into electricity with a simpler and more accessible manufacturing process when compared to competing technologies. We address their main characteristics such as structure, fundamental properties and the advances that have allowed for increases in efficiency in a short period of time, as well as the challenges still faced. Based on research in several articles on this subject, we discuss the promising future in the area of solar energy generation with a view to the use of perovskite solar cells.

Keywords: Perovskite; Solar Cells; Efficiency; Clean Energy; Energy Source.

1. INTRODUÇÃO

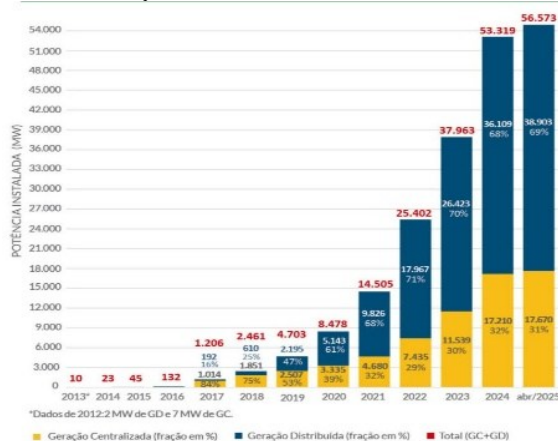
A crescente demanda por fontes de energias renováveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias fotovoltaicas mais eficientes e acessíveis. De acordo com Moehlecke et al. (2014), a energia fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz da luz em eletricidade por meio de absorção solar. Nos materiais semicondutores, essa

conversão gera um diferencial de potencial entre os extremos de sua estrutura. A célula solar é a unidade fundamental desse processo de conversão.

Nesse cenário, as células solares de Perovskita (CSP) vêm ganhando destaque devido ao seu rápido avanço em eficiência energética, baixo custo de fabricação e potencial para substituir ou complementar tecnologias tradicionais baseadas em silício. Desde sua introdução na última década, a eficiência da célula saltou de 11% para 26%, posicionando-os como uma das promissoras alternativas na geração de energia solar (Raphael, 2017; Durelian, 2024).

No contexto brasileiro, observa-se um crescimento expressivo da geração fotovoltaica conectada à rede (on grid) que passou de 14.505MW em 2021 para 56.573MW em abr/2025 conforme atesta o infográfico nº 79 (12/05/2025) da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), significando uma taxa de 290% da Geração Fotovoltaica, evidenciando o aumento do interesse por soluções energéticas sustentáveis no país. Esse cenário reforça a importância de tecnologias fotovoltaicas mais eficientes e economicamente viáveis, como às células solares de Perovskita.

Figura 1 - Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil.



Fonte: Solarian (2018, apud Solarian, s.d.)

A estrutura cristalina única da Perovskita combinada a versatilidade da composição química, se torna um material extremamente promissor para a conversão de energia solar em elétrica. Essas características intrínsecas proporcionam propriedades elétricas favoráveis à conversão de energia solar em elétrica, impulsionando avanços significativos na área (Raphael, 2017).

No entanto, apesar do progresso, segundo Raphael (2017), existem desafios que ainda persistem quanto à estabilidade desses dispositivos. Superar essa limitação é crucial para que as perovskitas atinjam seu pleno potencial e se tornem uma solução amplamente viável e duradoura para a geração de energia solar.

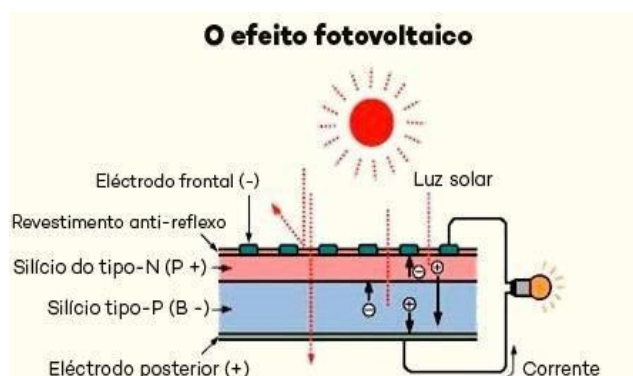
Esse artigo tem como objetivo realizar um estudo bibliográfico sobre a eficiência das células solares de perovskita, abordando os principais fatores que influenciam o seu desempenho, os avanços tecnológicos mais recentes e as perspectivas futuras para aplicação comercial. Através da análise de publicações científicas relevantes, busca-se compreender os caminhos que têm sido trilhados para aprimorar essa tecnologia e superar suas limitações.

2. FUNDAMENTOS DAS CÉLULAS SOLARES

O funcionamento de uma célula solar se deve principalmente ao efeito fotovoltaico descoberto em 1839 por Becquerel, ao observar que duas placas de latão imersa em um eletrólito líquido e ao iluminar essa solução, surgia um diferencial de potencial entre os eletrodos. Tempos depois, na década de 1870, Willoughby Smith, W. G. Adams e R. E. Day descobriram ao usar Selênio, que ele produzia um efeito fotovoltaico (Raphael, 2018; Moehlecke, 2014).

Fato que possibilitou que em 1883, Charles Fritts, construísse uma bateria solar com folhas de selênio com eficiência de apenas 1%, então em 1954, surgiram as primeiras células de Silício fabricados nos Laboratórios Bell, tendo eficiência de 6%.

Figura 2 - Funcionamento de uma célula solar.



Fonte: NeoSolar (2025).

A célula fotovoltaica converte luz solar em eletricidade usando materiais semicondutores, como o silício. Quando a luz atinge o material, ela libera elétrons, gerando uma corrente elétrica.

Para que isso funcione, a célula possui duas camadas (tipo p e tipo n) que criam um campo elétrico. Esse campo direciona os elétrons liberados, produzindo uma corrente contínua. A estrutura se completa com contatos metálicos para coletar a energia e um revestimento para absorver mais luz (Raphael, 2017; Carvalho et al., 2014).

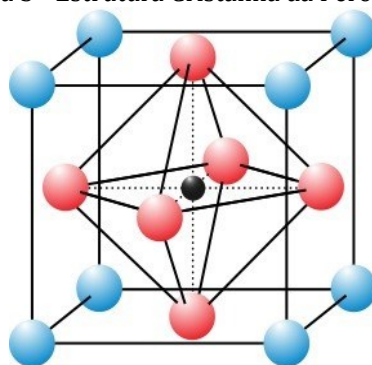
A eficiência da célula é limitada por fatores como a reflexão da luz e a perda de energia. Células de silício comuns chegam a 25% de eficiência, enquanto tecnologias mais avançadas (multijunção) podem ultrapassar 37%. O avanço da tecnologia depende de melhorias nos materiais e na estrutura das células (Moehlecke, 2014).

3. ESTRUTURA DAS CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITA

Segundo Raphael (2017), as Perovskitas, descobertas em 1839 pelo russo Gustav Rose, sendo seu nome uma homenagem ao mineralogista Lev Perovski, são uma classe de materiais cujas características revelam inúmeras e versáteis aplicações em diversos dispositivos tecnológicos. Porém este mineral não é encontrado puro na natureza, sendo sintetizado em laboratório.

Perovskita é o nome atribuído a uma ampla classe de materiais que compartilham a estrutura cristalina bem definida. É qualquer material que possui a mesma estrutura do mineral conhecido como óxido de cálcio e titânio ou oxotitanto de cálcio (CaTiO_3), com fórmula estrutural do tipo ABX_3 . Nesse arranjo cristalino, os átomos X ocupam os vértices de um cubo, os átomos B situam-se no centro das faces, e um átomo A está posicionado no centro do cubo.

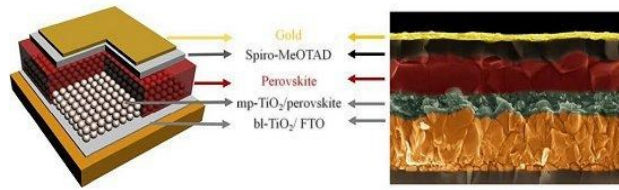
Figura 3 - Estrutura Cristalina da Perovskita.



Fonte: R.A. Vargas (apud ResearchGate, s.d.)

Segundo Raphael et.al (2017), em uma célula de Perovskita, a camada ativa é composta pelo minério perovskita e é colocada entre a camada transportadora de elétrons (ETL) e uma camada transportadora de buracos (HTL). Uma dessas camadas é depositada sobre um eletrodo transparente e sobre a outra camada é depositado um metal (Au, Ag ou Al), assim completando o dispositivo.

Figura 4 - Estrutura da célula solar de perovskita.



Fonte: Bradley (2015, apud Chemistry World)

4. PROPRIEDADES RELEVANTES

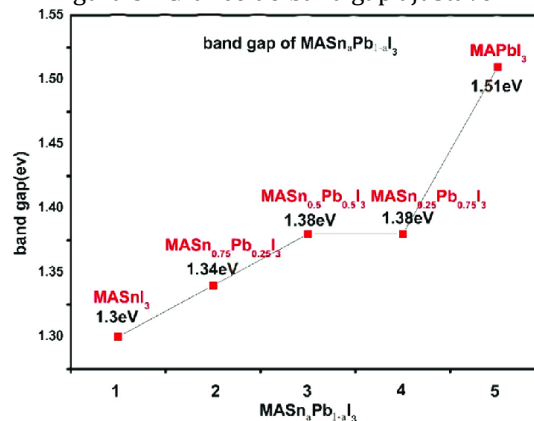
As perovskitas à base de haletos metálicos exibem propriedades ópticas excepcionais, que são um dos pilares de seu sucesso em aplicações fotovoltaicas. Essas propriedades derivam primariamente de um alto coeficiente de absorção em uma larga faixa do espectro eletromagnético, que abrange toda a região visível e se estende até aproximadamente 800 nm (Fernandes, 2016).

Para o composto canônico de iodeto de chumbo e metilamônio ($CH_3NH_3PbI_3$), as posições dos níveis de energia foram precisamente determinadas. Kim et al. (2012), através de medições de espectroscopia de refletância difusa, estabeleceram um band gap óptico direto de $E_g = 1,5\text{eV}$.

Adicionalmente, utilizando a técnica de espectroscopia fotoelétrica no ultravioleta (UPS), foi possível determinar a energia da banda de valência em $E_v = -5,43\text{eV}$ em relação ao vácuo. A partir desses dados, a posição da banda de condução é estimada em $E_c = -3,93\text{eV}$, conforme compilado por Marchioro (2014).

Contudo, a versatilidade óptica desses materiais vai além, pois seu band gap não é fixo. Ele pode ser sistematicamente ajustado por meio da engenharia composicional, que inclui a substituição do cátion orgânico (grupo alquil), a variação dos ânions haletos (I, Br, Cl) ou a troca do cátion metálico (Pb, Sn), permitindo otimizar a absorção de luz para diferentes arquiteturas de dispositivos.

Figura 5 - Gráfico do band gap ajustável.



Fonte: Silva et al. (2019, apud ScienceDirect)

As perovskitas $CH_3NH_3PbI_3$ se destacam por um longo comprimento de difusão de elétrons e lacunas, frequentemente superior a 1 micrômetro, o que viabiliza a coleta eficiente de cargas. Outra propriedade interessante é sua alta constante dielétrica, que confere ao material um forte caráter capacitivo. Estudos de espectroscopia de impedância confirmam que a perovskita pode acumular cargas em suas interfaces, um efeito diretamente relacionado ao seu comportamento elétrico (Marchioro, 2014).

5. EFICIÊNCIA

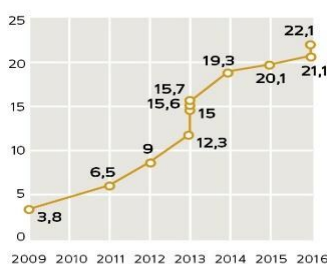
Desde a sua introdução em 2009, com eficiência inicial por volta de 3,8%, as células de perovskita avançaram rapidamente, alcançando eficiências superiores a 25% em um intervalo de 15 anos (Kojima et al., 2009; NREL, 2023). Dessa forma, esta evolução notória já superou o crescimento já observado nas tecnologias de células solares anteriores, como as produzidas com silício.

Seu desempenho é principalmente atribuído à capacidade do material absorver a luz solar em espectros menores, a facilidade na fabricação utilizando os métodos spin coating e a integração com células tipo tandem, onde há possibilidade de combinação com outros materiais, como o já citado silício (Raphael et al., 2017).

Figura 6 - Evolução da Eficiência da Perovskita.

Alto rendimento

Confira a evolução da eficiência energética da perovskita em testes de laboratório (em %)



Fonte: Vasconcelos, (2023, apud Revista Pesquisa FAPESP).

A facilidade de fabricação contribui significativamente para o seu potencial. Métodos de baixo custo e alta versatilidade, como o spin coating (revestimento por rotação), são amplamente utilizados em laboratórios para produzir filmes finos e uniformes de perovskita sobre diversos substratos. Essa simplicidade processual abre portas para uma produção em larga escala mais econômica em comparação com o silício.

O gráfico da figura 5 representa o progresso inicial até 2016, desde então, a curva de aprendizado continuou a subir, com pesquisadores focando na otimização da composição

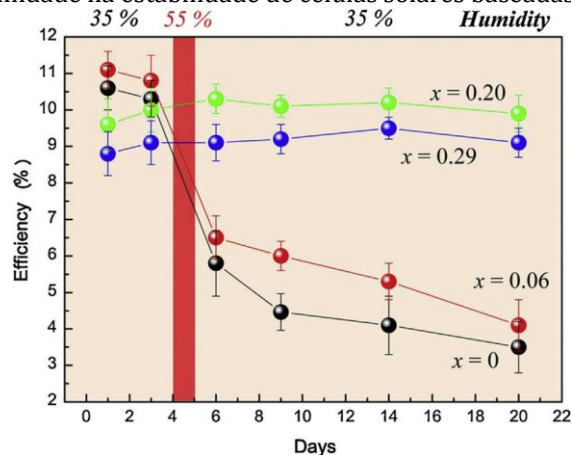
química dos materiais, aprimorar as interfaces entre as camadas de célula e desenvolver novas arquiteturas para maximizar a extração de energia e, crucialmente, a estabilidade do dispositivo.

6. DESAFIOS E LIMITAÇÕES

Atualmente, o avanço das células solares de perovskita (CSPs) é norteado por dois objetivos primordiais: a maximização da eficiência de conversão de energia e a garantia da estabilidade operacional a longo prazo. Um dos maiores desafios para a viabilidade comercial desta tecnologia reside na sensibilidade intrínseca de compostos como a perovskita de iodeto de chumbo e metilamônio ($CH_3NH_3PbI_3$) à umidade e ao oxigênio atmosférico. Para evitar a degradação durante a síntese, a maioria das etapas de fabricação é realizada em ambientes controlados e inertes (glove boxes), o que inevitavelmente eleva o custo e a complexidade do processo produtivo. A exposição subsequente a condições ambientes resulta em uma degradação estrutural do filme de perovskita, levando a uma perda significativa de desempenho fotovoltaico (Fernandes, 2016).

Em um trabalho seminal, Noh et al. (2013) abordaram diretamente o problema da estabilidade por meio da engenharia composicional. Ao estudar filmes de perovskita de haleto misto, com a fórmula geral $MAPb(I_{1-x}Br_x)_3$, eles fizeram uma descoberta crucial. A célula baseada em iodeto puro ($MAPbI_3$, onde $x = 0$) mostrou-se instável, exibindo uma queda de eficiência dramática ao ser exposta a um nível de umidade de 55%. No entanto, ao introduzir uma pequena fração de bromo ($x \geq 0,2$) na estrutura, substituindo parte do iodo, a estabilidade do dispositivo aumentou drasticamente, mantendo sua eficiência inicial mesmo sob as mesmas condições de umidade. A análise estrutural revelou que essa melhoria está diretamente correlacionada a uma transição de fase: a estrutura cristalina tetragonal, característica do $MAPbI_3$, transforma-se em uma estrutura cúbica mais estável nas composições com bromo. Este estudo demonstrou que a otimização da composição química é uma estratégia poderosa para mitigar a degradação e aproximar as CSPs da aplicação prática.

Figura 7 - Umidade na estabilidade de células solares baseadas em MAPbI_3 .



Fonte: Byranvand et al. (2019, apud ResearchGate)

Atualmente, as células com maior eficiência são baseadas em chumbo (Pb), um metal de natureza tóxica, dificultando aplicações fazendo com que os pesquisadores tenham um grande desafio, substituir o chumbo por materiais não tóxicos, a fim de não prejudicar o meio ambiente.

7. CONCLUSÕES

Neste artigo, foram analisados artigos a fim de fazer um estudo bibliográfico sobre a eficiência das células solares de perovskita.

Foi verificado que como a perovskita têm propriedades elétricas relevantes, principalmente o seu band gap ajustável e combinando-as, sendo a chave para alta eficiência de conversão de energia alcançada, através da engenharia, é possível otimizar o desempenho e sua estabilidade. Os resultados compilados indicam que a compreensão e o aprimoramento contínuo dessas características são o caminho para superar o desafio da durabilidade e consolidar a perovskita como um pilar na próxima geração de energia solar.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do professor Weverson Cirino durante a disciplina de Materiais Elétricos, 1º semestre de 2025, nos dando conhecimento a fim de realizar o artigo.

REFERÊNCIAS

BRADLEY, David. Processed perovskite has superior stability. In: Chemistry World, 16 ago. 2015. Disponível em: <https://www.chemistryworld.com/news/processed-perovskite-has-superior-stability/8862.article>. Acesso em: 17 jun. 2025.

BYRANVAND, M. M. et al. Moisture effect on the stability of heterojunction solar cells based on $\text{MAPbI}_{1-x}\text{Br}_x$. Materials Letters, v. 237, p. 356–360, 2019. Disponível em:

https://www.researchgate.net/figure/Moisture-effect-on-the-stability-of-heterojunction-solar-cells-based-on-MAPbI-1Ax-Br-x_fig3_296904352. Acesso em: 17 jun. 2025.

CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de; MESQUITA, Pedro Paulo Dias; ROCIO, Marco Aurélio Ramalho. A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira? BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 40, p. 205–233, set. 2014.

DURELIAN, R. Progresso na fabricação de células fotovoltaicas de filmes finos de Perovskita de alta eficiência, um estudo comparativo. 2024.

FERNANDES, Silvia Leticia. Desenvolvimento de células solares de perovskita baseadas em filmes de óxidos nanoestruturados. 2016.

KIM, H.-S. et al. Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%. Scientific Reports, v. 2, p. 591, 2012.

KOJIMA, A. et al. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. Journal of the American Chemical Society, v. 131, n. 17, p. 6050–6051, 2009.

MARCHIORO, A. Interfacial Charge Transfer Dynamics in Solid-State Hybrid Organic-Inorganic Solar Cells. [Tese] EPFL École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2014.

MOEHLECKE, A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014.

NEOSOLAR. Sistemas de energia solar fotovoltaica e seus componentes. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>. Acesso em: 17 jun. 2025.

NIU, G.; GUO, X.; WANG, L. Review of Recent Progress in Chemical Stability of Perovskite Solar Cells. Journal of Materials Chemistry A, p. Advance, 2015.

NOH, J. H. et al. Chemical management for colorful, efficient, and stable inorganic-organic hybrid nanostructured solar cells. Nano Letters, v. 13, p. 1764–1769, 2013.

OLIVEIRA, M. A. J. S. Estudo comparativo entre células solares perovskita e silício. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Contagem, 2021.

RAPHAEL, A. J. et al. Advances and challenges in perovskite solar cells. Renewable Energy Reviews, v. 81, p. 2127–2145, 2017.

RAPHAEL, E.; SILVA, M. N.; SZOSTAK, R.; SCHIAVON, M. A.; NOGUEIRA, A. F. Células solares de perovskitas: uma nova tecnologia emergente. Química Nova, v. 41, n. 1, p. 61–74, 2018.

SILVA, J.; OLIVEIRA, M.; PEREIRA, L. First-principles study on the electronic properties of perovskites. Materials Today, v. 12, n. 3, p. 123–130, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379719313695>. Acesso em: 17 jun. 2025.

SOLARIAN. Gráfico sobre geração distribuída. In: . GD: A verdade nua e crua. Site Solarian, s.l., 2018. Disponível em: <https://solarian.com.br/novidades/f/gd-a-verdade-nua-e-crua>. Acesso em: 17 jun. 2025.

VASCONCELOS, Yuri. Luz mais eficiente: células solares poderão suceder as de silício em painéis fotovoltaicos. Revista Pesquisa FAPESP, edição 260, atualizado em 12 jul. 2023. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/luz-mais-eficiente/>. Acesso em: 17 jun. 2025.

VARGAS, R. A. Figura 4 – Esquema típico de uma estrutura perovskita modificada por R. A. Vargas. In: . Study of X on perovskita, s.l., s.d. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Esquema-tipico-de-uma-estrutura-perovskita-6-modificada-por-RA-Vargas_fig3_250049217. Acesso em: 17 jun. 2025.

Capítulo 4

EFEITO DOS MATERIAIS CONDUTORES NAS PERDAS DE ENROLAMENTO EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

DOI: 10.51859/amplla.wme212.1125-4

Jheneffer T. O. Bentes ¹
Matheus D. F. Ferreira ²
Yasmin S. D. Silva ³
Weverson dos Santos Cirino ⁴

¹ Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Alameda Rio Branco nº92, CEP: 6901560

Manaus, AM, Brasil, E-mail:jtob.eng22@uea.edu.br

² Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Virgílio Ramos nº234, CEP:69027060

Manaus, AM, Brasil, E-mail:mdff.eng22@uea.edu.br

³ Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Av. Ramos Ferreira, CEP:69010425

Manaus, AM, Brasil, E-mail:ysds.eng22@uea.edu.br

⁴ Professor Efetivo do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Rio Umatumã, n 312, Conjunto Colina do Aleixo, Bairro São José Operário I, CEP: 69085-286

Manaus, AM, Brasil, E-mail: wdsantos@uea.edu.br

Resumo: Transformadores são equipamentos fundamentais na distribuição de energia elétrica, e a escolha adequada dos materiais utilizados em seu projeto é essencial para garantir a eficiência do sistema. Este artigo analisa comparativamente as perdas ôhmicas nos enrolamentos de transformadores de distribuição, utilizando condutores de cobre e alumínio. A pesquisa foi desenvolvida por meio de modelagem matemática e simulações computacionais, considerando a influência da temperatura na resistência elétrica dos materiais. Os resultados mostram que o cobre apresenta menores perdas por efeito Joule em comparação ao alumínio, mesmo quando este possui seção transversal maior para suportar a mesma corrente. No entanto, o alumínio destaca-se por seu menor custo e peso, o que pode torná-lo vantajoso em determinadas aplicações. A escolha do material deve considerar o equilíbrio entre desempenho elétrico, eficiência energética e viabilidade econômica.

Palavras-chaves: transformadores, perdas ôhmicas, cobre, alumínio, eficiência energética.

Abstract: Transformers are essential equipment in electric power distribution systems, and the proper selection of materials used in their design is crucial to ensure system efficiency. This article presents a comparative analysis of ohmic losses in distribution transformer windings using copper and aluminum conductors. The study was conducted through mathematical modeling and computational simulations, considering the influence of temperature on the electrical resistance of both materials. The results show that copper exhibits lower Joule losses compared to aluminum, even when the aluminum conductor has a larger cross-sectional area to support the same current. However, aluminum stands out for its lower cost and weight, which can make it advantageous in specific applications. The choice of material should balance electrical performance, energy efficiency, and economic feasibility.

Keywords: transformers, ohmic losses, copper, aluminum, energy efficiency.

1. INTRODUÇÃO

Os transformadores de distribuição possuem uma grande importância nos sistemas elétricos de potência, sendo responsáveis por adequar os níveis de tensão para o uso em

ambientes residenciais, comerciais e industriais. Dentre seus diversos componentes, os enrolamentos (ou bobinas) destacam-se por sua relevância funcional, já que conduzem a corrente elétrica necessária para a geração do campo magnético que percorre o núcleo do transformador.

No entanto, por serem compostos por materiais condutores, como o cobre e o alumínio, esses enrolamentos estão sujeitos a perdas de energia devido ao efeito Joule, fenômeno resultante da resistência elétrica à passagem de corrente. Essas perdas resistivas contribuem diretamente para a redução da eficiência do equipamento, sendo influenciadas por fatores como a resistividade do material e a temperatura de operação. Controlar essas perdas é essencial para garantir o desempenho, a durabilidade e a confiabilidade do transformador.

Diante disso, a escolha adequada do material condutor torna-se um aspecto crítico no projeto de transformadores, especialmente quando se busca um equilíbrio entre desempenho técnico e viabilidade econômica. Enquanto o cobre oferece excelente condutividade elétrica e resistência mecânica, o alumínio surge como alternativa atrativa devido ao seu menor custo e peso, embora com maior resistividade.

Este artigo tem como objetivo comparar as perdas ôhmicas nos enrolamentos de transformadores de distribuição utilizando condutores de cobre e alumínio. Por meio da análise das propriedades elétricas, térmicas e geométricas dos materiais, associada a modelagens matemáticas e simulações computacionais, busca-se avaliar o impacto da temperatura sobre o desempenho de cada material e fornecer subsídios técnicos para decisões mais eficientes no projeto e na manutenção de transformadores.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O cobre é um metal amplamente utilizado devido à sua elevada condutividade elétrica, excelente resistência à corrosão e boa conformabilidade. O cobre puro, especialmente o do tipo OFHC (Oxygen-Free High Conductivity), é o condutor metálico mais utilizado em aplicações elétricas, graças à sua baixa resistividade e alta pureza química.

Apesar de ser um metal macio e dúctil, o cobre pode ter suas propriedades mecânicas melhoradas por meio do trabalho a frio ou pela formação de ligas. Entre suas ligas mais comuns estão os latões (cobre-zinco) e os bronzes (cobre-estanho ou cobre com outros elementos como alumínio e silício), que são aplicados em cartuchos, bijuterias, instrumentos musicais, trocadores de calor, entre outros.

Além disso, ligas como o cobre-berílio apresentam excelente combinação de resistência mecânica, resistência à corrosão e condutividade, sendo utilizadas em aplicações exigentes como trens de pouso e instrumentos cirúrgicos.

No entanto, o alumínio é caracterizado por sua baixa massa específica ($2,7 \text{ g/cm}^3$), alta condutividade térmica e elétrica, e excelente resistência à corrosão em diversos ambientes. Sua estrutura cristalina CFC (cúbica de face centrada) confere alta ductilidade, mesmo em temperaturas muito baixas.

Embora sua condutividade elétrica seja cerca da metade da do cobre, o alumínio é amplamente empregado como condutor elétrico devido à sua leveza e custo reduzido. As ligas de alumínio, tanto fundidas quanto forjadas, são comuns em indústrias aeronáutica, automobilística e de embalagens (como latas de bebidas).

Entretanto, a principal limitação do alumínio é sua baixa temperatura de fusão (660°C), o que restringe sua aplicação em ambientes de alta temperatura.

Dentro de transformadores, tanto o cobre quanto o alumínio são empregados nos enrolamentos condutores (Figura 1). O critério de seleção entre eles envolve um equilíbrio entre condutividade elétrica, densidade, custo e desempenho térmico.

Figura 1 – Enrolamentos em transformadores trifásicos.



Fonte: <https://www.transformadoreletrico.com.br/transformador-de-baixa-tensao> e <https://www.solucoesindustriais.com.br/lista/transformador-trifasico-de-3-enrolamentos>.

O cobre é geralmente o mais escolhido devido à sua maior condutividade elétrica (reduzindo perdas ôhmicas), maior resistência mecânica (importante para suportar forças eletromagnéticas internas) e menor coeficiente de expansão térmica, o que melhora a confiabilidade sob variações de carga. Já o alumínio, embora apresente menor condutividade, é utilizado em transformadores onde o peso e o custo são fatores limitantes, especialmente em equipamentos de grande porte e menor criticidade técnica.

A escolha entre os dois materiais impacta diretamente no projeto térmico, nas perdas internas (especialmente as joule) e na eficiência global do transformador. Devido à menor densidade, o alumínio permite economia em peso estrutural, mas exige maior seção transversal

para compensar a menor condutividade elétrica, o que pode implicar em maiores dimensões dos enrolamentos.

3. METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem teórico-analítica, estruturada em três etapas principais: levantamento bibliográfico, modelagem matemática e simulação computacional.

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica com ênfase na norma IEEE Std C57.12.00 (IEEE, 2015) e em publicações especializadas (CHAPMAN, 2007; DEL VECCHIO et al., 2010), para identificar os principais parâmetros técnicos envolvidos nas perdas em enrolamentos de transformadores de distribuição.

Em seguida, elaborou-se a modelagem matemática das perdas ôhmicas nos enrolamentos, com base na expressão clássica:

$$P = I^2 \times R \quad (\text{equação 1})$$

em que P é a potência dissipada (W), I é a corrente (A) e R é a resistência do enrolamento (Ω). A resistência foi calculada por:

$$R = \rho \times \frac{l}{A} \quad (\text{equação 2})$$

sendo ρ a resistividade do material (Ω/m), l o comprimento do fio (m) e A área da seção transversal (m^2). Para garantir condições operacionais equivalentes, considerou-se que o enrolamento de alumínio possuía seção transversal maior do que o de cobre, a fim de suportar a mesma corrente nominal.

Além disso, foi aplicada uma correção térmica à resistividade, com a seguinte relação:

$$\rho_t = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (\text{equação 3})$$

onde ρ_0 é a resistividade a 20°C , α é o coeficiente de temperatura linear ($0,00393^\circ\text{C}^{-1}$ para o cobre e $0,00403^\circ\text{C}^{-1}$ para o alumínio), T a temperatura de operação e $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

Na terceira etapa, foi realizada uma simulação computacional no ambiente MATLAB, utilizando dados hipotéticos coerentes com a literatura. A simulação considerou dois cenários:

- Enrolamento de cobre: resistividade de $1,68 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$;
- Enrolamento de alumínio: resistividade de $2,82 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$;

Foram variáveis da simulação:

- Temperatura de operação: 20°C a 80°C ;

- Corrente de carga: 100 A (fixa);
- Dimensões típicas de enrolamento para transformadores de distribuição.

As simulações calcularam as perdas ôhmicas em função da temperatura para ambos os materiais, e os resultados foram apresentados em gráficos comparativos.

Opcionalmente, foi considerado um fator de correção para incorporar perdas adicionais relacionadas aos efeitos de frequência, conforme proposto por Dowell (1966), mas com foco principal nas perdas por efeito Joule, dada sua maior representatividade nas aplicações em transformadores de distribuição.

Tabela 1- Parâmetros utilizados.

Parâmetros	Valor (Cobre)	Valor (Alumínio)	Fonte / Referência
Resistência a 20°C (ρ_0)	$1.68 \times 10^{-8} \Omega.m$	$2.82 \times 10^{-8} \Omega.m$	IEEE Std C57.12.00 (2015); CHAPMAN
Coefficiente de temperatura linear (α)	$0,00393 ^\circ C^{-1}$	$0,00402 ^\circ C^{-1}$	CHAPMAN (2007); DEL VECCHIO et al
Temperatura inicial (T_0)	20°C	20°C	Padrão
Faixa de temperatura analisada	20 a 80°C	20 a 80°C	Hipótese
Corrente elétrica (I)	100A	100A	Estudo simulado
Comprimento do fio (l)	50m	50m	Estudo simulado
Área da seção transversal (A)	$80 \times 10^{-6} m^2$	$127 \times 10^{-6} m^2$	Equivalência de capacidade condutiva

Fonte: Os próprios autores.

4. RESULTADOS

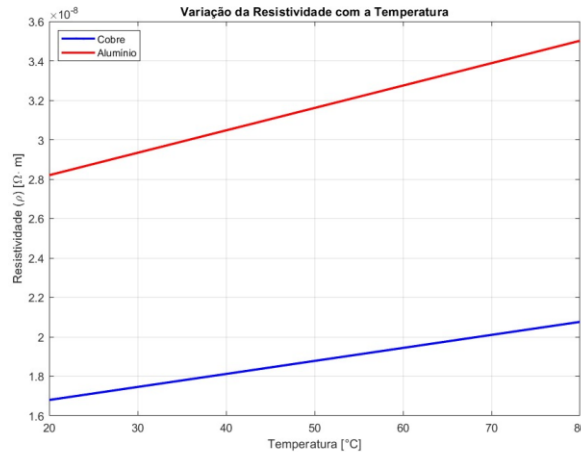
A análise foi realizada com base nas expressões matemáticas descritas na metodologia, considerando variações de temperatura e características físicas dos materiais.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros elétricos utilizados para o cálculo da resistência dos condutores e, conseqüentemente, das perdas Joule. Com os dados acima, foi possível calcular a resistência dos condutores em função da temperatura, utilizando a equação de correção térmica.

$$R_t = R_{20^\circ} [1 + \alpha \cdot (T - 20)] \quad (\text{equação 4})$$

A Figura 2 mostra a variação da resistividade dos condutores de cobre e alumínio com a temperatura, de 20 °C a 80 °C.

Figura 2 - Gráfico da variação da resistividade com a temperatura.



Fonte: os próprios autores.

Como esperado, o condutor de alumínio apresenta resistência superior ao do cobre em todas as faixas de temperatura, mesmo com maior área de seção transversal. A diferença se acentua com o aumento da temperatura devido ao maior coeficiente térmico do alumínio. Utilizando a equação de correção térmica:

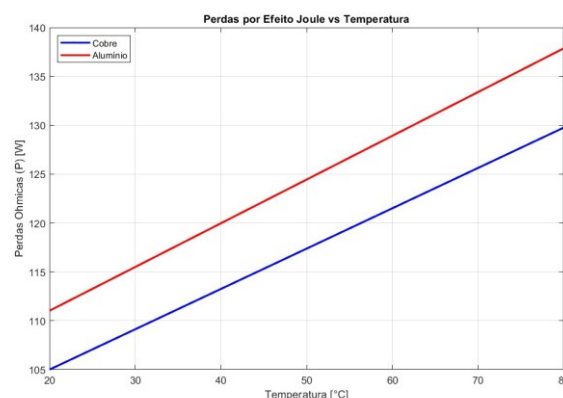
$$R_t = R_{20^{\circ}}[1 + \alpha \cdot (T - 20)]$$

Foi possível realizar os cálculos das perdas por efeito joule:

$$P = I^2 \cdot R_t$$

Os valores médios de perdas para cada material, na faixa de temperatura avaliada, estão de acordo com a Figura 3, onde mostra a variação das perdas nos condutores de cobre e alumínio com a variação da temperatura, de 20 $^{\circ}C$ a 80 $^{\circ}C$.

Figura3 - Gráfico das perdas por efeito joule versus temperatura.



Fonte: Os próprios autores.

Observa-se que o enrolamento de alumínio apresenta aproximadamente mais perdas ôhmicas que o de cobre nas mesmas condições de corrente. Esse resultado corrobora a

literatura técnica (IEEE, 2015; CHAPMAN, 2007), que destaca a superioridade elétrica do cobre em aplicações onde a eficiência energética é prioritária.

Contudo, apesar das maiores perdas, o alumínio apresenta vantagens econômicas e logísticas, como menor custo por kg e menor densidade, o que reduz o peso total do transformador. Tais fatores podem justificar sua aplicação em cenários onde o custo inicial tem maior peso que a eficiência a longo prazo.

5. DISCUSSÕES

Os resultados obtidos por meio da modelagem matemática e simulação computacional evidenciam diferenças significativas no comportamento dos materiais cobre e alumínio quanto às perdas ôhmicas em transformadores de distribuição. A resistência maior apresentada pelo alumínio, mesmo com aumento da seção transversal, implicou em perdas elétricas cerca de 64% superiores às do cobre, para a mesma corrente de operação.

Esse desempenho inferior do alumínio está diretamente relacionado à sua maior resistividade elétrica, além de um coeficiente térmico de resistividade ligeiramente mais elevado, o que acentua a elevação da resistência com o aumento da temperatura. Como os transformadores operam por longos períodos por efeito de carga contínua, mesmo pequenas diferenças de resistência representam grandes impactos cumulativos nas perdas totais e na eficiência energética ao longo da vida útil do equipamento.

Apesar disso, a escolha do material do enrolamento não se limita aos aspectos elétricos. O alumínio possui densidade significativamente menor que o cobre, resultando em transformadores mais leves, o que facilita o transporte e a instalação, especialmente em áreas remotas ou em estruturas de poste. Além disso, o custo por quilograma do alumínio é inferior ao do cobre, o que pode reduzir o custo de fabricação inicial do transformador (CHAPMAN, 2007; IEEE, 2015).

Outro aspecto importante é a durabilidade e confiabilidade mecânica dos terminais e conexões. O cobre, por possuir maior resistência mecânica e menor tendência à oxidação, tende a apresentar melhor desempenho em aplicações de alta confiabilidade ou sob condições ambientais adversas.

Portanto, a escolha entre cobre e alumínio deve considerar o perfil da aplicação, os custos de aquisição e operação, os requisitos de eficiência energética e as condições ambientais. Em sistemas onde a eficiência e a confiabilidade são prioritárias, o cobre se mostra mais vantajoso. Por outro lado, em situações de restrição orçamentária ou exigência de leveza, o

alumínio pode ser uma alternativa viável, desde que projetado com as devidas compensações dimensionais.

6. CONCLUSÃO

Diante disso, a análise das perdas em função da temperatura evidenciou que o cobre mantém desempenho superior em toda a faixa de operação simulada, o que implica diretamente em maior eficiência energética, menor aquecimento dos enrolamentos e vida útil mais longa do equipamento. Além disso, as menores perdas se traduzem em menor exigência de sistemas de resfriamento, redução de custos operacionais e menores impactos ambientais, especialmente em aplicações com carga contínua ou flutuante.

Por outro lado, o alumínio, embora economicamente mais acessível e mais leve, demanda cuidados adicionais no projeto, como o aumento da área condutora e maior atenção às conexões mecânicas e térmicas. Seus efeitos indesejados podem se agravar em ambientes com altas temperaturas ou por efeito de operação contínua, o que pode comprometer a confiabilidade do transformador a longo prazo.

As perdas nos enrolamentos dos transformadores representam um aspecto crítico no desempenho elétrico, térmico e econômico desses equipamentos. A escolha do material condutor, seja cobre ou alumínio, desempenha papel importante nesse contexto, pois suas propriedades elétricas e térmicas determinam o nível de dissipação de calor por efeito Joule. O cobre, com sua menor resistividade, tende a gerar menores perdas e suportar correntes mais elevadas com maior segurança térmica. Já o alumínio, apesar de seu custo reduzido e menor peso, requer maiores dimensões de condutores para compensar sua condutividade inferior.

Compreender e controlar essas perdas é essencial não apenas para melhorar a eficiência do transformador em si, mas também para promover sistemas elétricos mais sustentáveis e economicamente viáveis. Reduzir as perdas nos enrolamentos contribui para minimizar o desperdício de energia, reduzir a demanda por sistemas de resfriamento e prolongar a vida útil do equipamento, aspectos que são estratégicos em um cenário energético que exige cada vez mais eficiência e responsabilidade ambiental.

Portanto, a escolha entre cobre e alumínio deve considerar não apenas o custo inicial do material, mas também os aspectos térmicos, elétricos e operacionais do transformador, visando garantir a eficiência e durabilidade do sistema elétrico de distribuição. Em projetos onde o desempenho e a confiabilidade são críticos, o uso do cobre se justifica plenamente. Já o alumínio pode ser viável em aplicações de menor criticidade, desde que compensações construtivas sejam rigorosamente aplicadas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Universidade do Estado do Amazonas (UEA) pela estrutura e apoio durante a realização deste trabalho. Expresso também minha sincera gratidão ao professor Weverson dos Santos Cirino, pela orientação, incentivo e dedicação ao longo do desenvolvimento desta pesquisa. Sua experiência e disponibilidade foram muito importantes para a consolidação deste estudo.

REFERÊNCIAS

CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G. Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHAPMAN, Stephen J. Máquinas elétricas. 4. ed. São Paulo: AMGH, 2007.

DEL VECCHIO, Robert M.; SHARMA, Ram S.; PUJARA, Rajendra. Transformer design principles: with applications to core-form power transformers. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

DOWELL, P. Effects of eddy currents in transformer windings. Proceedings of the IEE, v. 113, n. 8, p. 1387–1394, 1966.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std C57.12.00-2015 – IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. New York: IEEE, 2015.

MEDEIROS, Aldo Vilela de et al. Materiais Elétricos. 3. ed. São Paulo: Érica, 2006.

Capítulo 5

ANÁLISE DA DISSIPAÇÃO TÉRMICA E SUAS RELAÇÕES COM ALTERAÇÕES ELÉTRICAS NOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM OPERAÇÃO

DOI: 10.51859/ampla.wme212.1125-5

Antony Alexsandre Marques de Souza ¹

Carlos Felipe Bezerra de Lima ²

Weverson dos Santos Cirino ³

¹ Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Pepino do Mar, n 306, Conjunto Habitacional IX, Bairro Distrito Industrial II, CEP: 69007-035

Manaus, AM, Brasil, E-mail: aamds.eng22@uea.edu.br

² Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Argonauta, n 269, Conjunto Habitacional IX, Bairro Distrito Industrial II, CEP: 69007-057

Manaus, AM, Brasil, E-mail: cfbdl.eng22@uea.edu.br

³ Professor Efetivo do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Rio Umatumã, n 312, Conjunto Colina do Aleixo, Bairro São José Operário I, CEP: 69085-286

Manaus, AM, Brasil, E-mail: wdsantos@uea.edu.br

Resumo: Este artigo apresenta uma análise comparativa da dissipação térmica e seu impacto no desempenho elétrico dos módulos fotovoltaicos (PV), com base exclusivamente nos dados de dois estudos experimentais. Ambos os estudos exploram os efeitos de técnicas de resfriamento passivo, como o resfriamento por evaporação com tecidos de algodão e fins de alumínio (CWIRAF), e métodos de resfriamento ativo, na eficiência dos módulos PV. Os resultados dos experimentos indicam que o resfriamento passivo reduz significativamente a temperatura dos módulos PV, levando a uma melhoria na eficiência elétrica, enquanto os métodos de resfriamento ativo também mostram melhorias, mas exigem mais recursos. O artigo destaca a eficácia desses sistemas de resfriamento em melhorar o desempenho dos módulos PV sob condições de alta temperatura.

Palavras-chaves: Módulos fotovoltaicos, Dissipação térmica, Desempenho elétrico, Resfriamento passivo, Resfriamento ativo, Análise comparativa.

Abstract: This paper presents a comparative analysis of thermal dissipation and its impact on the electrical performance of photovoltaic (PV) modules, based solely on data from two experimental studies. Both studies explore the effects of passive cooling techniques, such as evaporative cooling with cotton wicks and aluminum fins (CWIRAF), and active cooling methods, on PV module efficiency. The results from the experiments indicate that passive cooling significantly reduces the temperature of PV modules, leading to improved electrical efficiency, while active cooling methods also show improvements but require additional resources. The paper highlights the effectiveness of these cooling systems in enhancing PV performance under high-temperature conditions.

Keywords: Photovoltaic modules, Thermal dissipation, Electrical performance, Passive cooling, Active cooling, Comparative analysis.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por fontes de energia renovável tem gerado um aumento significativo no interesse e na implementação de sistemas fotovoltaicos (PV) como uma solução limpa e sustentável para a geração de eletricidade. Este movimento é impulsionado pela necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e a dependência de combustíveis

fósseis, além da busca por alternativas que atendam ao consumo crescente de energia em um contexto de mudanças climáticas (NWAIGWE et al., 2019). No entanto, apesar de sua crescente adoção, o desempenho dos módulos fotovoltaicos é amplamente influenciado por fatores ambientais, com destaque para as variações de temperatura, um dos principais desafios enfrentados por essas tecnologias, especialmente em regiões quentes e áridas (DIDA et al., 2021).

À medida que a temperatura dos módulos fotovoltaicos aumenta, sua eficiência elétrica diminui devido a um fenômeno conhecido como degradação térmica. Esse fenômeno ocorre porque os materiais semicondutores utilizados nas células fotovoltaicas, como o silício, perdem parte de suas propriedades elétricas à medida que a temperatura sobe. Como resultado, a tensão de circuito aberto das células fotovoltaicas diminui e a mobilidade dos portadores de carga se reduz, impactando diretamente a conversão da energia solar em eletricidade (ABDELMAKSOOD et al., 2018). A eficiência de um módulo fotovoltaico pode cair até 0,5% para cada aumento de 1°C na temperatura, o que pode resultar em uma queda significativa no desempenho ao longo do tempo, especialmente em locais com alta intensidade solar e temperatura ambiente elevada. Esse impacto negativo na eficiência pode ser mitigado por meio da implementação de sistemas de resfriamento adequados, que ajudem a controlar a temperatura dos módulos e a preservar seu desempenho máximo (HAMMAD et al., 2021).

Diversas técnicas de resfriamento, tanto passivas quanto ativas, foram desenvolvidas e aplicadas para manter as temperaturas operacionais ideais dos módulos fotovoltaicos, garantindo maior eficiência e prolongando sua vida útil. Os métodos de resfriamento passivo, como o resfriamento por evaporação utilizando tecidos de algodão integrados com fins de alumínio, são especialmente vantajosos, pois não requerem fontes externas de energia e oferecem uma solução econômica, sustentável e de baixo custo (ALKTRANEE et al., 2023). Esses métodos tiram proveito de processos naturais, como a dissipação de calor por evaporação ou condução, para reduzir a temperatura dos módulos, sem a necessidade de energia adicional, o que torna essas soluções ideais para locais com recursos limitados ou em regiões com alto custo de energia.

Por outro lado, os métodos de resfriamento ativo, como sistemas de circulação de água ou ventilação forçada, têm se mostrado mais eficientes no controle da temperatura, proporcionando uma redução mais significativa na temperatura dos módulos e, conseqüentemente, um aumento no desempenho elétrico (RIBEIRO et al., 2016). No entanto, esses sistemas frequentemente demandam recursos adicionais, como bombas, ventiladores ou outras fontes de energia externa, o que pode aumentar o custo inicial de instalação e os custos

operacionais ao longo do tempo. Embora esses sistemas ativos possam ser mais eficazes em regiões com altas temperaturas constantes, seu uso é mais adequado quando se busca maximizar a eficiência em locais onde os custos de operação não sejam uma restrição.

Este estudo tem como objetivo fornecer uma análise comparativa detalhada da dissipação térmica e do desempenho elétrico dos módulos fotovoltaicos, utilizando diferentes técnicas de resfriamento. Através de dados provenientes de dois estudos experimentais, será possível identificar as soluções de resfriamento mais eficazes para melhorar o desempenho dos módulos fotovoltaicos, especialmente sob condições de alta temperatura. Além disso, a comparação entre os métodos passivos e ativos permitirá avaliar qual técnica é mais adequada para diferentes cenários, considerando fatores como custo, eficiência e viabilidade operacional. Os resultados obtidos podem contribuir para o desenvolvimento de soluções de resfriamento mais eficientes, ajudando a otimizar a geração de energia fotovoltaica e a garantir sua viabilidade a longo prazo em diversas condições ambientais.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Funcionamento dos Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos convertem a luz solar em eletricidade através do efeito fotovoltaico, um processo que ocorre quando a radiação solar incide sobre materiais semicondutores, como o silício. A luz solar excita os elétrons no material, criando uma corrente elétrica. Esse processo é essencial para a geração de energia limpa, que pode ser usada diretamente ou convertida para corrente alternada através de um inversor, para ser alimentada em redes elétricas (MAGHAMI et al., 2016).

A eficiência dos módulos fotovoltaicos depende de vários fatores, sendo a temperatura um dos mais críticos. Embora a eficiência de conversão dos módulos fotovoltaicos de silício possa atingir até 20% em condições ideais, essa eficiência diminui à medida que a temperatura dos módulos aumenta. O aquecimento do módulo fotovoltaico leva a uma diminuição na tensão de circuito aberto das células fotovoltaicas, o que reduz sua capacidade de gerar eletricidade. Para cada aumento de 1°C na temperatura dos módulos, sua eficiência elétrica pode diminuir cerca de 0,4% a 0,5%, o que representa uma perda significativa de desempenho em ambientes quentes, com alta irradiação solar (RAMOS et al., 2010).

Em regiões de clima quente e árido, onde a intensidade solar é elevada, o aumento da temperatura dos módulos pode causar uma degradação do desempenho elétrico, afetando diretamente a produção de energia. A dissipação de calor nos módulos fotovoltaicos se torna

um fator importante para garantir que eles operem de maneira eficiente. Para mitigar os efeitos da temperatura, técnicas de resfriamento têm sido implementadas para reduzir o aquecimento dos módulos, garantindo maior eficiência e maior vida útil ao sistema fotovoltaico (JING-YAN et al., 2021).

Portanto, a relação entre temperatura e eficiência é fundamental para o desempenho dos módulos fotovoltaicos. O controle térmico adequado dos módulos, seja por métodos passivos ou ativos de resfriamento, é essencial para minimizar as perdas de eficiência e maximizar a geração de energia. Soluções como o resfriamento por evaporação e sistemas de ventilação forçada são algumas das alternativas que têm sido desenvolvidas para manter os módulos em temperaturas ideais, garantindo o melhor desempenho possível e ampliando sua durabilidade.

2.2. Dissipação Térmica

A dissipação térmica é um processo essencial para o funcionamento adequado de sistemas fotovoltaicos, uma vez que os módulos fotovoltaicos convertem uma parte da luz solar em eletricidade, mas também geram calor no processo (JING-YAN et al., 2021). Esse calor, se não dissipado de maneira eficiente, pode elevar a temperatura do módulo e afetar diretamente sua eficiência. A maior parte da energia solar que incide sobre os módulos fotovoltaicos não é convertida em eletricidade, mas sim em calor, o que aumenta a temperatura do módulo. Esse aumento de temperatura tem um impacto negativo na eficiência do sistema, visto que a conversão de energia diminui à medida que a temperatura sobe.

Nos módulos fotovoltaicos, o aumento de temperatura reduz a tensão de circuito aberto das células fotovoltaicas, resultando em uma menor geração de eletricidade. A cada aumento de 1°C na temperatura, a eficiência do módulo pode diminuir entre 0,4% e 0,5%. Este efeito é especialmente crítico em regiões com alta radiação solar, onde a temperatura pode facilmente ultrapassar os 60°C, levando a uma degradação do desempenho elétrico (YIN, 2023). O controle da temperatura, portanto, se torna uma prioridade para garantir a eficiência na conversão de energia solar em eletricidade e, conseqüentemente, otimizar o desempenho dos módulos fotovoltaicos.

A dissipação de calor nos módulos fotovoltaicos ocorre por três principais mecanismos: condução, convecção e radiação. A condução térmica permite que o calor seja transferido ao longo dos materiais sólidos, como as camadas de silício, que são os componentes principais das células fotovoltaicas. A convecção ocorre quando o calor é transferido da superfície do módulo para o ar ao seu redor, sendo um dos mecanismos mais importantes para a dissipação de calor.

Por fim, a radiação térmica é o processo pelo qual o módulo fotovoltaico emite radiação infravermelha para o ambiente.

Para otimizar a dissipação térmica e reduzir os impactos negativos do aumento de temperatura, diversas soluções de resfriamento foram desenvolvidas, tanto passivas quanto ativas. O resfriamento passivo não requer energia externa e utiliza processos naturais, como a evaporação e a condução, para promover a dissipação de calor. Soluções como o uso de materiais com alta condutividade térmica, dissipadores de calor e sistemas de ventilação natural são exemplos de técnicas passivas eficazes. Por outro lado, o resfriamento ativo, que utiliza ventiladores ou sistemas de circulação de água, pode ser mais eficaz na redução da temperatura, mas exige mais energia e recursos adicionais.

A implementação de soluções de resfriamento adequadas, seja por métodos passivos ou ativos, é fundamental para manter a temperatura dos módulos fotovoltaicos dentro de níveis ideais, garantindo que eles operem com máxima eficiência e, ao mesmo tempo, prolongando sua vida útil. A escolha entre resfriamento passivo ou ativo depende de diversos fatores, incluindo o custo, a disponibilidade de energia e as condições climáticas da região onde os módulos estão instalados. No geral, a dissipação térmica eficiente não apenas melhora a eficiência dos módulos fotovoltaicos, mas também contribui para a sustentabilidade e a longevidade dos sistemas fotovoltaicos, sendo um fator crucial para o sucesso da energia solar como uma fonte confiável e renovável de eletricidade.

2.3. Relação Temperatura x Desempenho Elétrico

A temperatura é um fator fundamental que influencia diretamente o desempenho dos módulos fotovoltaicos. À medida que a temperatura dos módulos aumenta, sua eficiência elétrica tende a diminuir. Esse efeito é causado principalmente pela degradação térmica dos materiais semicondutores, como o silício, presentes nas células fotovoltaicas. Quando os módulos fotovoltaicos são expostos a altas temperaturas, a tensão de circuito aberto das células solares diminui, o que resulta em uma menor geração de eletricidade.

Essa redução na eficiência ocorre porque o aumento da temperatura afeta negativamente a mobilidade dos portadores de carga (elétrons e lacunas) dentro do material semicondutor, o que dificulta a geração de corrente elétrica. Esse fenômeno é conhecido como "efeito térmico" e é uma das principais causas de perdas de desempenho em sistemas fotovoltaicos, especialmente em regiões com alta irradiação solar e altas temperaturas (RIBEIRO et al., 2016).

Além disso, o aquecimento excessivo pode causar a degradação dos materiais usados no módulo, como o encapsulamento e as camadas de proteção, o que acelera o envelhecimento dos módulos e pode levar a falhas estruturais e elétricas. Como resultado, os módulos fotovoltaicos perdem não apenas eficiência imediata, mas também têm sua vida útil reduzida (TOUTI et al., 2023).

Portanto, a temperatura e a eficiência dos módulos fotovoltaicos estão intimamente relacionadas. A dissipação de calor se torna essencial para garantir que os módulos operem de forma eficiente e prolonguem sua vida útil. Técnicas de resfriamento, tanto passivas quanto ativas, são utilizadas para mitigar os efeitos térmicos e melhorar a performance dos módulos, garantindo maior aproveitamento da energia solar e evitando perdas causadas pelo aquecimento excessivo.

3. METODOLOGIA

A presente pesquisa tem como base uma abordagem qualitativa e quantitativa, com foco na análise comparativa de resultados experimentais de estudos já publicados que tratam da dissipação térmica em sistemas fotovoltaicos híbridos (PVT – Photovoltaic Thermal). O objetivo é compreender como as técnicas de resfriamento aplicadas nestes sistemas influenciam as características elétricas dos módulos fotovoltaicos e, assim, apoiar a análise da dissipação térmica em módulos fotovoltaicos convencionais em operação.

3.1. Seleção dos trabalhos-base

Foram selecionados dois artigos científicos que apresentam estudos experimentais sobre sistemas PVT com diferentes estratégias de resfriamento. Os critérios de seleção foram:

- O trabalho deve conter experimentos em condições reais de operação (ambiente externo ou simulado).
- Os dados devem incluir variáveis térmicas (temperatura dos módulos, ambiente, fluido de resfriamento) e variáveis elétricas (tensão, corrente, potência e/ou eficiência).
- O sistema analisado deve ser composto por módulos fotovoltaicos convencionais (monocristalino ou policristalino), com ou sem integração de sistema de resfriamento ativo ou passivo.

Os artigos selecionados serão identificados neste trabalho como Artigo A (DIDA et al., 2021) e Artigo B (ALKTRANEE et al., 2023), sendo descritos a seguir:

- Artigo A: Avaliação experimental de sistema PVT com resfriamento ativo por circulação de água.
- Artigo B: Estudo comparativo entre resfriamento passivo por aletas e sistema convencional sem resfriamento.

3.2. Extração e Análise dos Resultados Experimentais

A partir dos artigos selecionados, serão extraídas as seguintes informações experimentais:

- Temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos ao longo do dia.
- Potência elétrica gerada (instantânea ou média horária).
- Eficiência do módulo com e sem resfriamento.
- Diferenças observadas no comportamento da curva I-V e na tensão de circuito aberto.

3.3. Aplicação dos Resultados à Análise dos Módulos em Operação

Com base nas conclusões obtidas nos dois estudos experimentais, será realizada uma análise crítica da dissipação térmica em módulos fotovoltaicos convencionais em operação real (sem sistema PVT). Essa análise buscará:

- Estimar perdas por efeito térmico em sistemas reais sem resfriamento.
- Identificar possíveis melhorias de desempenho que poderiam ser obtidas com estratégias passivas de dissipação.
- Relacionar os dados dos artigos à curva de eficiência de módulos operando sob diferentes condições ambientais.

3.4. Simulação com MATLAB: Avaliação Térmico-Elétrica de Módulos PV com e sem Resfriamento

Com o objetivo de reforçar a análise comparativa, foi desenvolvida uma simulação em MATLAB para estimar o impacto da dissipação térmica sobre as variáveis elétricas dos módulos fotovoltaicos. A simulação utiliza o modelo de circuito equivalente de um gerador fotovoltaico (BOUNECHBA et al., 2014), apresentado na figura 1, considerando as seguintes equações fundamentais:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{equação 1})$$

$$I_0(T) = I_{0ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(\frac{qE_g}{k} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (\text{equação 2})$$

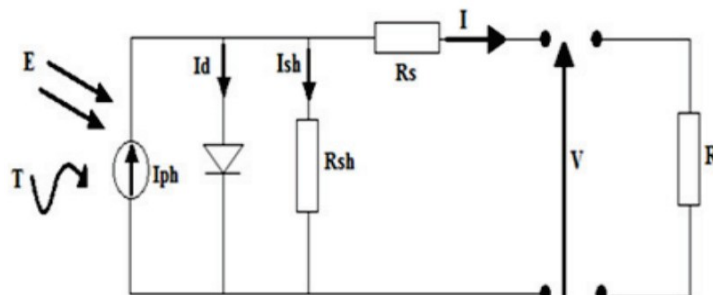
Parâmetros utilizados:

$$\eta_{ref} = 20.42\%$$

$$T_{ref} = 25^\circ C$$

$$\beta = 0,0005$$

Figura 1 - Circuito equivalente de um gerador fotovoltaico.



Fonte: (BOUNECHBA, H. et al., 2014).

Os parâmetros utilizados são provenientes do datasheet do módulo GCL-P6/60 275W (GCL, 2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos a partir da análise dos estudos experimentais selecionados (Artigo A e Artigo B), correlacionando-os com os efeitos térmicos observados nos módulos fotovoltaicos em operação e discutindo as implicações práticas sobre o desempenho elétrico.

4.1. Comparação dos Efeitos da Temperatura nas Características Elétricas

Ambos os artigos confirmam a influência significativa da temperatura na eficiência elétrica dos módulos fotovoltaicos. No Artigo A, que utiliza resfriamento ativo com circulação de água, foi observada uma redução média de $17,1^\circ C$ na temperatura dos módulos, conforme evidenciado na Figura 2, que mostra a redução da temperatura do módulo em diferentes horários do dia. Essa redução térmica resultou em um aumento de aproximadamente 12% na potência máxima (P_{max}), ilustrado na Figura 3, onde são apresentados os picos de potência comparando sistemas com e sem resfriamento. A tensão de circuito aberto (V_{oc}) também apresentou ganho médio de 6.5%, refletido na maior eficiência registrada em horários de alta irradiância, conforme mostrado na Figura 4.

Por sua vez, o Artigo B, que implementa resfriamento passivo por dissipadores térmicos (aletas), registrou uma redução térmica maior, de cerca de 31,4%. Essa variação está refletida nas eficiências elétrica e térmica ao longo do dia, como ilustrado na Figura 6, que demonstra a eficiência em diferentes horários. O sistema passivo promoveu um aumento de 66,6% na potência gerada e 8,6% na eficiência global dos módulos, confirmando que soluções mais simples também contribuem para a mitigação dos efeitos negativos do calor.

4.2. Relação Entre Dissipação Térmica e Estabilidade Elétrica

Nos dois estudos, a dissipação térmica mostrou-se essencial para garantir maior estabilidade nos parâmetros elétricos durante o dia, especialmente entre 11h e 15h, quando a irradiância solar é mais intensa. A menor variação da temperatura proporciona uma curva I-V mais estável, refletida nas figuras que mostram tanto a temperatura constante do módulo (Figura 2) quanto a estabilidade da eficiência elétrica (Figura 5). Isso reduz o estresse térmico, diminuindo a degradação prematura dos módulos.

4.3. Eficiência Espacial e Implicações Práticas

A melhoria na eficiência promovida pelos sistemas de resfriamento, tanto ativo quanto passivo, se traduz em maior geração de energia por área instalada, o que é particularmente vantajoso em ambientes com espaço limitado. A Figura 5 evidencia o ganho expressivo de potência do sistema com resfriamento ativo, reforçando a relevância dessas técnicas para o retorno econômico do investimento em instalações fotovoltaicas.

4.4. Considerações sobre Degradação Térmica

Além do impacto imediato na eficiência, a temperatura elevada, especialmente acima de 60°C, acelera a degradação dos módulos, causando defeitos como delaminação e hot spots. Portanto, a adoção de estratégias de dissipação térmica analisadas nos artigos atua como medida preventiva importante para prolongar a vida útil dos sistemas.

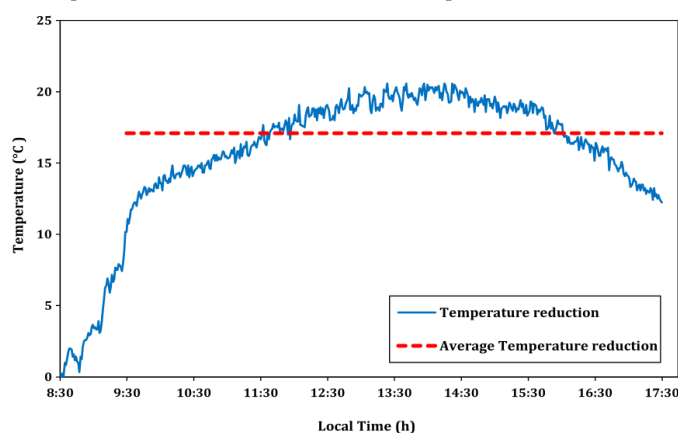
4.5. Resultados da Simulação: Eficiência em Função da Temperatura

Com o objetivo de complementar a análise dos dados experimentais, foi realizada uma simulação em MATLAB para representar graficamente a influência da temperatura na eficiência elétrica de módulos fotovoltaicos, com e sem a aplicação de técnicas de resfriamento térmico. Foram simuladas duas condições térmicas: sem resfriamento (temperatura de operação variando até 65°C) e com resfriamento (considerando uma redução média de 15°C). O gráfico

obtido, ilustrado na figura 7, evidencia uma queda linear na eficiência com o aumento da temperatura. A aplicação do resfriamento demonstrou um ganho médio de até 2% na eficiência absoluta, o que representa uma melhoria significativa considerando grandes áreas instaladas.

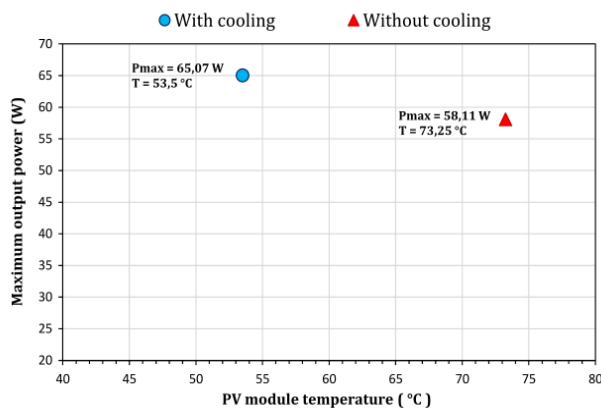
A simulação reforça os dados experimentais dos artigos analisados, confirmando a importância da dissipação térmica como estratégia para mitigar perdas de desempenho em módulos operando sob alta irradiância. Esses resultados demonstram, de forma clara e visual, que o controle da temperatura é fundamental para preservar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos, sendo as soluções passivas e ativas analisadas estratégias viáveis para ambientes de alta temperatura.

Figura 2 - Redução de temperatura no módulo fotovoltaico para diferentes horários do dia (Artigo A).



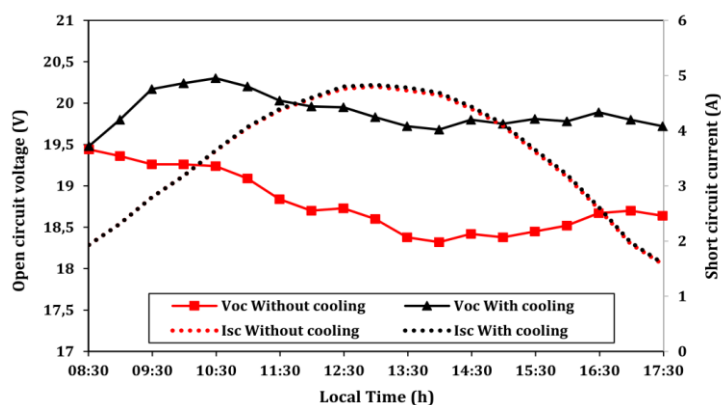
Fonte: Os próprios autores.

Figura 3 - Picos de potência para sistema com e sem resfriamento (Artigo A).



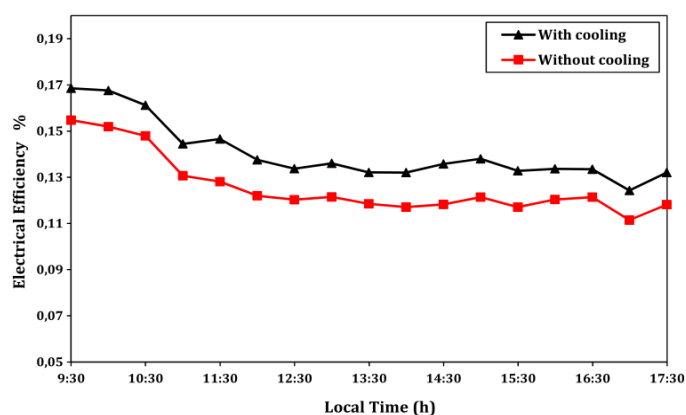
Fonte: Os próprios autores.

Figura 4 - Tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito (Artigo A).



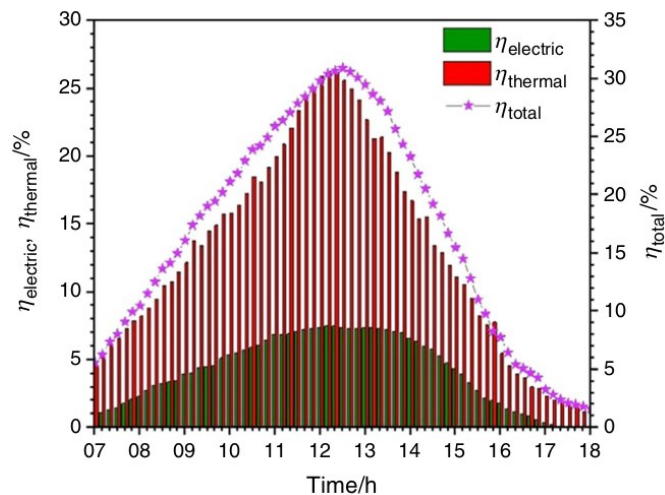
Fonte: Os próprios autores.

Figura 5 - Eficiência elétrica em diferentes horários do dia (Artigo A).



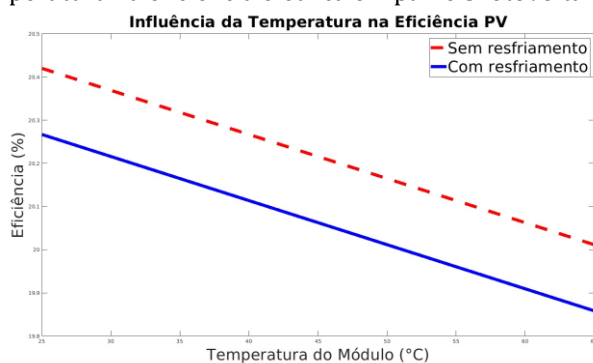
Fonte: Os próprios autores.

Figura 6 - Eficiências elétrica e térmica em diferentes horários do dia (Artigo B).



Fonte: Os próprios autores.

Figura 7 - Influência da temperatura na eficiência elétrica em painéis fotovoltaicos com e sem resfriamento.



Fonte: Os próprios autores.

5. CONCLUSÕES

A análise dos dados experimentais reforça que a dissipação térmica eficiente está diretamente associada à melhoria no desempenho elétrico dos módulos fotovoltaicos. Estratégias de resfriamento ativo ou passivo contribuem não apenas para o aumento da produção energética, mas também para maior estabilidade e menor degradação dos sistemas ao longo do tempo. Este trabalho apresentou uma análise comparativa sobre os efeitos da dissipação térmica no desempenho elétrico de módulos fotovoltaicos em operação, com base em estudos experimentais e simulação computacional. A partir dos resultados obtidos, foi possível destacar os seguintes pontos:

- A temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos exerce influência direta sobre a eficiência e a potência gerada. Os dados experimentais confirmam que a redução térmica, seja por métodos ativos ou passivos, resulta em ganhos significativos de desempenho elétrico.
- Além dos ganhos em eficiência, a dissipação térmica promove maior estabilidade dos parâmetros elétricos, especialmente nos horários de pico solar, reduzindo a degradação térmica e prolongando a vida útil dos módulos.
- A simulação realizada no MATLAB reforçou essas observações, mostrando que a eficiência dos módulos decresce linearmente com o aumento da temperatura, e que a aplicação de estratégias de resfriamento pode recuperar até 2% de eficiência absoluta, o que representa um impacto relevante em larga escala.
- A adoção de técnicas simples de resfriamento, como aletas, ventilação natural ou materiais evaporativos, pode representar uma solução viável e de baixo custo para melhorar o desempenho de sistemas fotovoltaicos em regiões de alta irradiância e temperaturas elevadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do professor orientador Weverson Cirino pela oportunidade da realização deste trabalho e à Universidade do Estado do Amazonas pela infraestrutura e recursos necessários.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-MAKSOOD, A. M.; SOLIMAN, F. A. S.; SAAD, Fouad. Performance Dependence of (IV) and (CV) for Solar Cells on Environmental Conditions. *Journal of Advances in Physics*, v. 14, n. 1, 2018.
- ALKTRANEE, Mohammed; BENCS, Péter. Experimental comparative study on using different cooling techniques with photovoltaic modules. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 148, n. 9, p. 3805-3817, 2023.
- BOUNECHBA, H. et al. Comparison of perturb & observe and fuzzy logic in maximum power point tracker for PV systems. *Energy Procedia*, v. 50, p. 677-684, 2014.
- DHAUNDIYAL, Alok; ATSU, Divine. Modeling of photovoltaic module using the MATLAB. *JNRD-Journal of Natural Resources and Development*, v. 9, p. 59-69, 2019.
- DIDA, Mustapha et al. Experimental investigation of a passive cooling system for photovoltaic modules efficiency improvement in hot and arid regions. *Energy Conversion and Management*, v. 243, p. 114328, 2021.
- GCL. GCL-P6/60 high efficiency multicrystalline module. Jiangsu Province: GCL (Group) Holdings Co., Ltda, 2016. Disponível em: <http://www.sunscapesolar.com.au/s/GCL-270-75.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- HAMMAD, Waleed et al. Thermal management of grid-tied PV system: A novel active and passive cooling design-based approach. *IET Renewable Power Generation*, v. 15, n. 12, p. 2715-2725, 2021.
- JING-YAN, Zhu et al. Analyses of heat dissipation of direct-cooling backsheets of crystalline silicon photovoltaic modules at ambient temperatures. *Acta Physica Sinica*, v. 70, n. 9, 2021.
- MAGHAMI, Mohammad Reza et al. Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 59, p. 1307-1316, 2016.
- NWADHAUNDIYAL, Alok; ATSU, Divine. Modeling of photovoltaic module using the MATLAB. *JNRD-Journal of Natural Resources and Development*, v. 9, p. 59-69, 2019.
- IGWE, K. N.; MUTABILWA, Philemon; DINTWA, Edward. An overview of solar power (PV systems) integration into electricity grids. *Materials Science for Energy Technologies*, v. 2, n. 3, p. 629-633, 2019.
- RAMOS, Figueiredo; CARDOSO, António; ALCASO, Adérito. Hybrid photovoltaic-thermal collectors: A review. In: *Emerging Trends in Technological Innovation: First IFIP WG 5.5/SOCOLNET Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, DoCEIS*

2010, Costa de Caparica, Portugal, February 22-24, 2010. Proceedings 1. Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 477-484.

RIBEIRO, Indira Ponte; DOS SANTOS MATOS, Francisco Frederico; ALEXANDRIA, Auzuir Ripardo. Avaliação Computacional da Influência da Temperatura na Potência de um Painei Fotovoltaico. Conexões-Ciência e Tecnologia, v. 10, n. 5, p. 28-33, 2016.

TOUTI, Ezzeddine et al. Experimental and numerical study of the PVT design impact on the electrical and thermal performances. Case Studies in Thermal Engineering, v. 43, p. 102732, 2023.

YIN, Zirui et al. Ventilation and heat dissipation analysis of photovoltaic roof. In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2023. p. 012001.

Capítulo 6

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CONDUTORES DE COBRE E ALUMÍNIO

DOI: 10.51859/amplla.wme212.1125-6

Edvaldo Canuto de Vasconcelos ¹

Rayssa Andrade Martins ²

Rayssa Maia Gomes ³

Weverson dos Santos Cirino ⁴

¹ Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Rio Mamoré, n 01, Bairro Armando Mendes, CEP: 69089340

Manaus, AM, Brasil, E-mail: ecdv.eng22@uea.edu.br

² Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Rio Bijogó, n 50, Bairro Novo Aleixo, CEP: 69098-187

Manaus, AM, Brasil, E-mail: ram.eng22@uea.edu.br

³ Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Leopoldo Carpinteiro Péres, n 17, Bairro Petrópolis, CEP: 69063-510

Manaus, AM, Brasil, E-mail: rmg.eng22@uea.edu.br

⁴ Professor Efetivo do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Rio Umatumã, n 312, Conjunto Colina do Aleixo, Bairro São José Operário I, CEP: 69085-286

Manaus, AM, Brasil, E-mail: wdsantos@uea.edu.br

Resumo: Este artigo apresenta uma análise comparativa entre condutores elétricos de cobre e alumínio, com foco em eficiência energética, desempenho técnico e impacto econômico ambiental em sistemas elétricos. De acordo com os parâmetros como resistividade elétrica, condutividade térmica, densidade, custo por quilograma e consumo energético na produção, foram realizados cálculos quantitativos por diferentes cenários de aplicação. Os resultados indicam que o cobre possui superioridade em termos de condutividade e estabilidade térmica, enquanto o alumínio se destaca pelo menor peso, custo inicial reduzido e viabilidade em projetos de grande escala. A partir dos comparativos a escolha dos materiais depende do contexto técnico e econômico do projeto, a considerar as perdas por efeito Joule, as exigências mecânicas e a sustentabilidade de cada material. A análise fornece subsídios para a seleção racional de condutores elétricos, contribuindo para o desempenho durabilidade dos sistemas elétricos.

Palavras-chaves: condutividade elétrica; eficiência energética; cobre; alumínio; sistemas elétricos.

Abstract: This article presents a comparative analysis between copper and aluminum electrical conductors, focusing on energy efficiency, technical performance, and economic-environmental impact in electrical systems. Based on parameters such as electrical resistivity, thermal conductivity, density, cost per kilogram, and energy consumption in production, quantitative calculations were conducted for various application scenarios. The results show that copper offers superior electrical conductivity and thermal stability, while aluminum stands out for its lower weight, reduced initial cost, and suitability for large-scale projects. The material selection depends on the technical and economic context of each application, considering Joule effect losses, mechanical requirements, and sustainability practices. This analysis provides a technical basis for the rational selection of conductors, contributing to the optimization of energy performance and system durability.

Keywords: electrical conductivity; energy efficiency; copper; aluminum; electrical systems.

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica está presente em quase todos os aspectos da vida moderna, desde os serviços mais básicos até os processos industriais mais complexos. Por isso, qualquer falha ou

ineficiência nos sistemas de distribuição pode causar consequências graves, tanto financeiros quanto sociais. Imagine uma falha em um hospital, escola ou centro de abastecimento causada por aquecimento excessivo de cabos ou perda de energia por condutores mal dimensionados. Situações como essa mostram o quanto a escolha dos materiais nos sistemas elétricos é importante.

Diante desse contexto, o cobre e o alumínio são os principais materiais utilizados como condutores elétricos. Cada um possui vantagens e limitações que influenciam o desempenho da instalação, os custos do projeto, a segurança das pessoas e até a vida útil dos sistemas. Por isso, entender qual deles é mais adequado para cada situação não é apenas uma escolha técnica, é uma decisão que pode impactar o fornecimento contínuo e seguro de energia elétrica.

Esta pesquisa surge da necessidade de examinar de forma mais aprofundada esses dois materiais, considerando fatores como condutividade, peso, custo e impacto ambiental. O objetivo é fornecer uma base sólida que ajude profissionais da área a fazer escolhas mais conscientes e eficientes, contribuindo para sistemas elétricos mais seguros, duráveis e sustentáveis e, por consequência, garantindo que a energia chegue com qualidade a quem precisa dela todos os dias.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Realizar uma análise comparativa das propriedades dos condutores de cobre e alumínio, avaliando suas propriedades para escolher o material adequado em diferentes aplicações.

2.2. Objetivos Específicos:

- Investigar as propriedades elétricas, como condutividade e resistência elétrica dos condutores de cobre e alumínio;
- Analisar o custo-benefício de cada material, levando em conta fatores como custo por metro, durabilidade e possibilidade de reciclagem;
- Avaliar como as propriedades térmicas dos materiais afetam as conexões e risco de falhas ao longo do tempo;
- Fornecer informações técnicas para ajudar na escolha do material condutor mais apropriado em projetos.

3. JUSTIFICATIVA

A escolha dos materiais condutores é influenciada pela busca por tecnologias eficazes. O cobre e o alumínio são destaques devido às suas características específicas que afetam seu desempenho. Analisar esses materiais utilizando dados recentes é essencial para a tomada de decisões técnicas. Conhecer as vantagens e desvantagens de cada condutor é essencial para profissionais na área, a fim de selecionar o mais apropriado conforme os requisitos específicos. Este artigo tem como objetivo oferecer uma análise sobre o uso do cobre e do alumínio como condutores de eletricidade.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

O cobre, representado quimicamente por Cu e com número atômico 29, destaca-se como um metal de transição de coloração avermelhada, muito empregado por sua notável capacidade de conduzir eletricidade e calor. A organização de seus átomos em uma estrutura cúbica de faces centradas (CFC) facilita sua deformação e moldagem em fios. Quando em sua forma mais pura, o cobre alcança uma condutividade elétrica de cerca de 58 MS/m a 20 °C (IACS). Ele é composto principalmente por cobre metálico, podendo conter pequenas quantidades de outros elementos como prata, oxigênio e fósforo, dependendo de como foi refinado. O cobre obtido por eletrólise, por exemplo, atinge um grau de pureza superior a 99,9%.

Além do cobre puro, diversas ligas metálicas à base de cobre possuem combinações únicas. O cobre possui capacidade de formar ligas com outros metais, permitindo combinar suas propriedades com características complementares, como maior resistência mecânica, estabilidade térmica ou qualidades estéticas.

No sistema UNS (Unified Numbering System), as ligas de cobre classificam-se em dois grupos principais. As ligas trabalhadas são produzidas por processos mecânicos como laminação e extrusão, que deformam o metal a frio ou quente, oferecendo maior precisão dimensional e resistência mecânica. Já as ligas fundidas são obtidas por processos de vazamento do metal líquido em moldes, sendo ideais para peças complexas que não poderiam ser fabricadas por outros métodos.

Entre as ligas mais importantes destacam-se o latão e o bronze. O latão (cobre e zinco) apresenta boa resistência à corrosão, facilidade de usinagem e condutividade satisfatória; e o bronze (cobre e estanho), que se destaca por sua alta resistência mecânica, à fadiga e à corrosão. Outras ligas relevantes incluem o cobre-níquel, resistente em ambientes marinhos; o cobre-berílio, que alia alta resistência mecânica à boa condutividade elétrica; e a níquel-prata

utilizada em aplicações decorativas e monetárias devido ao seu aspecto prateado. Devido à sua versatilidade, as ligas de cobre são empregadas em setores como construção civil, indústria naval, mineração, sistemas de condução elétrica, arquitetura, decoração e até na indústria bélica.

Por outro lado, o alumínio (Al, número atômico 13) é um metal leve com arranjo atômico também cúbico de faces centradas, com densidade de $2,70 \text{ g/cm}^3$. Sua capacidade de conduzir eletricidade é da ordem de $35,46 \text{ MS/m}$ a 20°C , um valor inferior ao do cobre, mas sua leveza compensa essa diferença em diversas aplicações. O alumínio usado como condutor geralmente é uma liga de alta pureza (acima de 99,5%), que pode incluir pequenas porções de silício, ferro e cobre, que aumentam sua resistência mecânica.

O cobre e o alumínio possuem boa resistência à corrosão. O cobre desenvolve uma camada protetora composta de óxidos, enquanto o alumínio forma uma camada de óxido de alumínio que protege o material.

Em termos de condução de calor, o cobre apresenta uma condutividade térmica de aproximadamente $400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, enquanto a do alumínio de $235 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. A capacidade de condução térmica é crucial para evitar superaquecimento em equipamentos. O cobre se destaca pela dissipação eficiente de calor gerado por altas correntes, mantendo os cabos mais estáveis. Já o alumínio, apesar de sua condutividade menor, compensa com menor peso e maior área de contato.

A NBR 5410:2004, que trata de Instalações Elétricas de Baixa Tensão, define as diretrizes para sistemas elétricos de até 1000 V em corrente alternada e 1500 V em corrente contínua. Ela fornece instruções claras sobre a seleção de fios e cabos, além de limitar o uso de condutores de alumínio, principalmente em locais muito frequentados, como escolas, hospitais, residências comuns e áreas públicas. Essa restrição se deve às propriedades do alumínio, que podem afetar a condução da eletricidade e aumentar o risco de superaquecimento e incêndios.

Se for permitido o uso de alumínio, é essencial seguir regras técnicas específicas, como utilizar cabos com área de seção transversal mínima de 16 mm^2 , terminais e conectores adequados e garantir o aperto dos terminais com equipamentos calibrados. É também recomendável que profissionais qualificados realizem inspeções regulares, dada a maior dificuldade na realização de conexões seguras com alumínio.

O cobre é considerado um material seguro e versátil, sendo preferido em qualquer instalação elétrica de baixa tensão devido à sua durabilidade, resistência à corrosão e facilidade de instalação. A NBR 5410 reconhece essas características ao permitir o uso de cobre em aplicações relevantes. Portanto, ao escolher o material do condutor, é fundamental considerar

não somente desempenho e custo, mas também as normas e os requisitos de segurança elétrica estabelecidos.

5. METODOLOGIA

Esta pesquisa empregou uma metodologia quantitativa para contrastar cabos de cobre e alumínio, fundamentada na coleta e interpretação de dados experimentais. Primeiramente, foram definidos critérios essenciais para a avaliação, como a resistividade elétrica, o peso específico, a robustez mecânica, a capacidade de condução de calor, o preço por unidade de peso e a durabilidade esperada dos componentes.

As informações foram reunidas de fontes confiáveis, incluindo normas internacionais e artigos científicos. Em seguida, realizou-se a análise numérica comparativa dos critérios definidos, utilizando fórmulas e modelos para determinar variáveis como a área da seção transversal necessária para o tráfego de correntes elétricas idênticas, o peso total dos cabos e o preço estimado para diversas utilizações.

Um exemplo para esta pesquisa é a determinação da área da seção transversal necessária para cabos de cobre e alumínio para o transporte de uma corrente elétrica de 119 A. Levando em consideração as resistividades típicas dos materiais e preservando a mesma resistência permitida para o circuito, a área transversal A do cabo pode ser obtida pela seguinte equação:

$$A = \frac{\rho L}{R} \quad (\text{equação 1})$$

onde:

- ρ é a resistividade do material,
- L é o comprimento do condutor (considerado fixo para comparação),
- R é a resistência máxima permitida para garantir a segurança e eficiência.

Para o mesmo comprimento e resistência, a relação entre as áreas dos condutores de alumínio e cobre é dada pela razão das resistividades, evidenciando que o alumínio precisa de uma área maior para transportar a mesma corrente.

Além disso, o peso total do condutor é calculado multiplicando-se a área da seção transversal pelo comprimento e pela densidade do material:

$$P = A * L * d_p \quad (\text{equação 2})$$

onde:

- P é o peso total,

- L é o comprimento do condutor,
- d_p é a densidade do material.

Por fim, o impacto ambiental foi avaliado quantitativamente através do consumo energético médio na produção dos materiais, expresso em megajoules por quilograma (MJ/kg), comparando o valor energético necessário para produção e reciclagem do cobre e do alumínio.

As propriedades (Tabela 1) e os resultados foram organizados em tabelas e gráficos para facilitar a comparação objetiva entre os condutores, oferecendo uma base quantitativa para a seleção dos materiais em função das características específicas da aplicação.

Tabela 1 – Propriedades físicas e elétricas do cobre e do alumínio.

Propriedade	Cobre (Cu)	Alumínio (Al)
Condutividade elétrica σ (MS/m) a 20 °C	59,6	35,46
Condutividade térmica (W/m·K)	400	235
Resistividade elétrica ρ ($\Omega \cdot m$)	$1,68 \times 10^{-8}$	$2,82 \times 10^{-8}$
Densidade (g/cm ³)	8,96	2,70

Fonte: Autoria Própria.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base na metodologia, foram calculadas as áreas das seções transversais necessárias para que condutores de cobre e alumínio transportassem uma corrente elétrica de 151 A, considerando a mesma resistência máxima admissível em um trecho padrão de 100 metros de comprimento.

Considerando as resistividades elétricas da Tabela 1 e utilizando a fórmula da resistência, mantida a mesma resistência R , a área transversal do alumínio deve ser aproximadamente 1,68 vezes maior que a do cobre para transportar a mesma corrente.

Para um condutor de cobre com seção de 50 mm², de acordo com a Tabela 36 da NRB 5410 para o valor de corrente citado, a seção equivalente para o alumínio será:

$$A_{AL} = 50 \times \frac{2,82 \times 10^{-8}}{1,68 \times 10^{-8}} = 84 mm^2 = 84 \times 10^{-6} m^2$$

Em relação ao peso, passando as densidades da Tabela 1 para metros:

Cobre: 8960000 g/m³

Alumínio: 2700000 g/m³

E o comprimento fixo de 100 m, o peso total dos condutores é calculado pela equação 2.

Peso do cobre:

$$P_{Cu} = (50 \times 10^{-6}) \times 100 \times 8960000 = 43,45 kg$$

Peso do alumínio:

$$P_{Al} = (84 \times 10^{-6}) \times 100 \times 2700000 = 22,68 \text{ kg}$$

Portanto, apesar da maior área necessária, o condutor de alumínio pesa aproximadamente 47,08% menos que o condutor de cobre para a mesma capacidade de transporte de corrente.

Quanto ao custo, considerando preços médios atuais:

Cobre: R\$ 40,00/kg

Alumínio: R\$ 10,00/kg

O custo total dos condutores para 100 m é:

Cobre: 43,45 kg \times R\$ 40,00 = R\$ 1.738,00

Alumínio: 22,68 kg \times R\$ 10,00 = R\$ 226,80

Após fazer uma comparação, os resultados atingiram os objetivos propostos.

Em relação às propriedades elétricas e térmicas, o cobre demonstrou ser melhor, apresentando menor resistividade elétrica e maior condutividade térmica. Essas características o tornam ideal para aplicações que exigem alta eficiência energética e controle térmico.

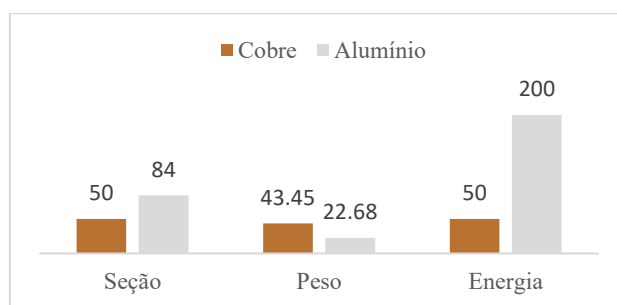
Do ponto de vista mecânico e estrutural, o alumínio destacou-se por ser leve, sendo quase 50% mais leve que o cobre para a mesma capacidade de condução. Isso torna mais fácil usar alumínio em estruturas no ar, como cabos ou componentes móveis, porque reduz o esforço necessário e até os custos de suporte.

Em termos econômicos, embora exija maior seção transversal para aplicações elétricas, o alumínio apresenta custo inicial aproximadamente 87% inferior ao do cobre (Figura 2). Essa diferença o torna atrativo para projetos de grande escala com restrições orçamentárias.

No aspecto ambiental, embora a produção primária de alumínio consuma cerca de quatro vezes mais energia (200 MJ/kg) que a do cobre (50 MJ/kg) - conforme ilustrado na Figura 1 -, sua alta reciclabilidade (requerendo apenas 5% da energia inicial contra 15% do cobre) compensa significativamente esse impacto ao longo do ciclo de vida, enquanto o cobre, apesar de sua menor energia de extração, enfrenta desafios ambientais mais severos relacionados à mineração.

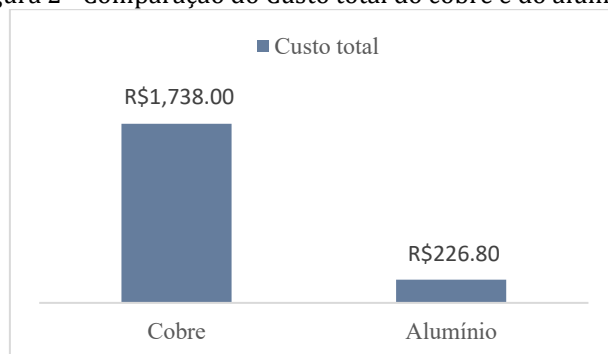
Escolher entre cobre e alumínio para condutores é um equilíbrio entre fatores técnicos, econômicos e ambientais. O cobre é ótimo em aplicações que precisam de alta eficiência energética, confiabilidade e um tamanho compacto, enquanto o alumínio é mais indicado para projetos maiores, onde o foco é economizar, além de ser leve e mais sustentável, já que é fácil de reciclar.

Figura 1 – Comparação de seção, peso e energia do cobre e do alumínio com base nos resultados.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 2 - Comparação do Custo total do cobre e do alumínio.



Fonte: Autoria Própria.

7. CONCLUSÕES

O estudo realizado apresentou uma avaliação objetiva sobre as diferenças entre condutores de cobre e alumínio, considerando fatores como desempenho elétrico, condutividade térmica, peso, custo e impacto ambiental. Ficou evidente que o cobre é mais indicado para aplicações que exigem maior eficiência, confiabilidade e controle térmico, enquanto o alumínio oferece vantagens significativas em termos de custo e leveza, sendo útil para projetos de maior escala e menor complexidade.

Apesar disso, o uso do alumínio deve ser feito com cuidado, sempre em conformidade com as normas técnicas vigentes, especialmente a NBR 5410, que estabelece restrições quanto à seção mínima, ao tipo de conexão e ao ambiente de instalação. Não cumprir essas exigências pode comprometer a segurança das instalações e afetar diretamente o fornecimento de energia elétrica, um serviço essencial para o funcionamento da sociedade.

Como proposta de aprimoramento, a pesquisa pode ser expandida com a análise de condutores submetidos a diferentes condições operacionais, como variações de temperatura, umidade ou instalação subterrânea. Além disso, o estudo de novas ligas condutivas, que combinem boas propriedades elétricas com maior resistência mecânica ou menor impacto ambiental, representa uma linha de investigação promissora, principalmente nas áreas de energia renovável, mobilidade elétrica e redes inteligentes.

Com base nos dados apresentados, a análise ajuda a tomar decisões mais técnicas e certas na hora de escolher fios, aumentando a segurança, performance e cuidado com o ambiente nos sistemas elétricos.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer de forma especial ao professor Weverson Cirino, por toda a orientação, paciência e apoio durante a realização deste trabalho. Também somos gratos à Universidade do Estado do Amazonas (UEA) por proporcionar esse espaço de aprendizado, e aos nossos familiares, que sempre nos incentivaram e apoiaram.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas. ABNT NBR 5410 Instalações Elétricas de Baixa Tensão. 2004. Rio De Janeiro;

Caveagna, L.H., Silva, M.R. da, Santos, V.T. dos, Santos, G.A. dos. COBRE E SUAS LIGAS Tecnologia da manufatura, caracterização e aplicações. 2024. Editora Edgard Blucher, São Paulo;

Padilha, A. F. Materiais de Engenharia: Microestrutura e propriedades. 2007. Hemus Editora, São Paulo;

PRODWEB. Resumo: Cobre e suas ligas | Informações Técnicas | Cobre | Metais & Ligas. Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=109>>.

Schmidt, W. Materiais elétricos: condutores e semicondutores. 2010. Editora Edgard Blucher, São Paulo;

Vlack, L.H.V. Princípios de Ciência dos Materiais. 1970. Editora Edgard Blucher, São Paulo.

Capítulo 7

ANÁLISE COMPARATIVA DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE METAIS PUROS (COBRE E ALUMÍNIO) E LIGAS METÁLICAS (LATÃO E BRONZE)

DOI: 10.51859/amplla.wme212.1125-7

Ricardo Henrique Paiva Leão ¹

Jerrah Guimarães Carobeira de Araujo ²

João Paulo Modesto Damiano ³

Weverson dos Santos Cirino ⁴

¹ Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Marquês de Paraná, 15, Flores, CEP: 69058-065. Manaus, AM, Brasil.

E-mail: rhpl.eng21@uea.edu.br

² Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Ibiá, 60, Cidade Nova, CEP: 69090-630. Manaus, AM, Brasil.

E-mail: jgcda.eng23@uea.edu.br

³ Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Avenida Coronel Teixeira, 5803, Ponta Negra, CEP: 69037-901. Manaus, AM, Brasil.

E-mail: jpmde.eng22@uea.edu.br

⁴ Professor Efetivo do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Rio Umatumã, n 312, Conjunto Colina do Aleixo, Bairro São José Operário I, CEP: 69085-286

Manaus, AM, Brasil, E-mail: wdsantos@uea.edu.br

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise comparativa da condutividade elétrica de dois metais puros, o cobre e o alumínio, e de duas ligas metálicas amplamente utilizadas na engenharia, o latão (Cu-Zn) e o bronze (Cu-Sn). A pesquisa foi desenvolvida por meio de revisão bibliográfica, com foco em dados técnicos e científicos relacionados às propriedades elétricas, mecânicas e estruturais desses materiais. Observou-se que os metais puros apresentam condutividade significativamente superior, sendo o cobre o material de referência com 100% IACS, enquanto o alumínio apresenta cerca de 61% IACS. Já as ligas metálicas, devido à adição de elementos de liga, apresentaram condutividades menores, variando de 15% a 37% IACS para o bronze e de 28% a 35% para o latão. Apesar da menor eficiência elétrica, essas ligas oferecem vantagens como maior resistência mecânica, durabilidade e resistência à corrosão. Os resultados demonstram que a escolha do material depende do equilíbrio entre desempenho elétrico, propriedades mecânicas e exigências específicas da aplicação.

Palavras-chaves: Condutividade elétrica; Cobre; Alumínio; Latão; Bronze; Materiais metálicos.

Abstract: This study presents a comparative analysis of the electrical conductivity of two pure metals—copper and aluminum—and two widely used metallic alloys—brass (Cu-Zn) and bronze (Cu-Sn). The research was conducted through a literature review, focusing on technical and scientific data related to the electrical, mechanical, and structural properties of these materials. It was observed that pure metals exhibit significantly higher conductivity, with copper being the industry reference at 100% IACS, while aluminum shows approximately 61% IACS. The metallic alloys, due to the addition of alloying elements, displayed lower conductivity values, ranging from 15% to 37% IACS for bronze and from 28% to 35% for brass. Despite the reduced electrical efficiency, these alloys offer advantages such as higher mechanical strength, durability, and corrosion resistance. The results demonstrate that the selection of a material depends on balancing electrical performance, mechanical properties, and the specific requirements of the application.

Keywords: Electrical conductivity; Copper; Aluminum; Brass; Bronze; Metallic materials.

1. INTRODUÇÃO

A condutividade elétrica é uma propriedade física de grande relevância na seleção de materiais metálicos para aplicações em sistemas elétricos e eletrônicos. Entre os metais puros, o cobre destaca-se como o condutor padrão da indústria, com condutividade elétrica estimada em aproximadamente 100% IACS (International Annealed Copper Standard), sendo superado apenas pela prata (106% IACS) (MONTEIRO et al., 2011). O alumínio, embora apresente condutividade menor (cerca de 61% IACS), é amplamente utilizado em função de seu menor custo, densidade reduzida e boa resistência à corrosão (BROOKS, 1988).

Paralelamente, o estudo de ligas metálicas, como o latão (liga de cobre com zinco) e o bronze (liga de cobre com estanho), visa atender à crescente demanda por materiais com propriedades combinadas, como condutividade elétrica satisfatória e maior resistência mecânica. Tais ligas são empregadas em contatos elétricos, conectores, chaves e componentes estruturais, onde a resistência mecânica deve ser conciliada com uma perda aceitável de condutividade (MONTEIRO et al., 2010).

Além da composição química, fatores como o processamento dos materiais, microestrutura, presença de fases secundárias e tratamentos térmicos influenciam diretamente na condutividade elétrica (CARRIÓ et al., 2009). O uso da metalurgia do pó tem se destacado como técnica eficiente na obtenção de ligas homogêneas e com microestruturas controladas, permitindo, por exemplo, alcançar condutividades acima de 90% IACS em ligas de Cu-Ni-Cr após tratamento térmico adequado (CARRIÓ et al., 2010; MONTEIRO et al., 2011).

Além da composição química, fatores como o processamento dos materiais, microestrutura, presença de fases secundárias e tratamentos térmicos influenciam diretamente na condutividade elétrica (CARRIÓ et al., 2009). O uso da metalurgia do pó tem se destacado como técnica eficiente na obtenção de ligas homogêneas e com microestruturas controladas, permitindo, por exemplo, alcançar condutividades acima de 90% IACS em ligas de Cu-Ni-Cr após tratamento térmico adequado (CARRIÓ et al., 2010; MONTEIRO et al., 2011).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral:

Realizar uma análise comparativa, com base em revisão bibliográfica, da condutividade elétrica e de outras propriedades relevantes dos metais puros cobre e alumínio e das ligas metálicas bronze (Cu-Sn) e latão (Cu-Zn), visando compreender suas aplicações em sistemas elétricos e eletrônicos.

2.2. Objetivos Específicos:

- Identificar os principais aspectos físicos e químicos que influenciam a condutividade elétrica do cobre, alumínio, bronze (Cu-Sn) e latão (Cu-Zn).
- Levantar, com base em literatura técnica, os valores médios de condutividade elétrica e propriedades complementares desses materiais.
- Comparar o desempenho elétrico dos metais puros com o das ligas metálicas, considerando também densidade, resistência mecânica e aplicabilidade.
- Discutir os critérios técnicos que justificam a escolha de cada material em aplicações elétricas, com base em desempenho e viabilidade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido com base em uma revisão bibliográfica de caráter exploratório e comparativo, abordando a condutividade elétrica de dois metais puros (cobre e alumínio) e duas ligas metálicas (latão e bronze). A seleção das fontes incluiu artigos científicos, relatórios técnicos e anais de congressos voltados à Engenharia de Materiais e Física do Estado Sólido. Foram priorizados estudos que apresentassem dados sobre propriedades elétricas, composição química, estrutura cristalina, tratamentos térmicos e processos de fabricação como fundição convencional e metalurgia do pó. As informações obtidas serviram de base para uma análise crítica e comparativa, considerando o desempenho dos materiais em diferentes contextos de aplicação.

4. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu em uma análise comparativa baseada em revisão bibliográfica, com foco na condutividade elétrica de metais puros (cobre e alumínio) e ligas metálicas (latão e bronze). Foram coletados dados técnicos de fontes confiáveis da literatura científica, como artigos, relatórios técnicos e anais de congressos da área de Engenharia de Materiais.

As propriedades analisadas incluíram condutividade elétrica (em % IACS), densidade (g/cm^3) e resistência mecânica (MPa). A condutividade foi tratada com base no padrão IACS, em que o cobre recozido é referência com 100% de condutividade. Todos os dados foram organizados em uma tabela comparativa, permitindo avaliar o desempenho relativo entre os materiais.

A análise foi realizada de forma qualitativa, considerando as vantagens e limitações técnicas de cada material, de acordo com suas propriedades e aplicações típicas na engenharia elétrica. Não foram realizados ensaios práticos ou simulações computacionais, sendo o estudo fundamentado exclusivamente em dados secundários disponíveis na literatura.

5. RESULTADOS

A comparação entre metais puros e ligas metálicas evidencia o impacto da composição química e da estrutura cristalina na condutividade elétrica e em outras propriedades físicas e mecânicas. A condutividade elétrica foi analisada com base no padrão IACS (International Annealed Copper Standard), tomando o cobre recozido como referência com 100% de condutividade.

O cobre puro, além de ser o material condutor de referência com 100% IACS, apresenta excelente ductilidade, alta resistência à corrosão e boa estabilidade térmica. Sua densidade é de $8,96 \text{ g/cm}^3$ e sua resistência mecânica varia entre 210 e 250 MPa. Essas características tornam o cobre ideal para uso em cabos elétricos, bobinas de motores e componentes de alta confiabilidade em ambientes agressivos (MARQUES et al., 2011).

O alumínio puro possui condutividade elétrica de aproximadamente 61% IACS, inferior ao cobre, mas com vantagens como menor densidade ($2,70 \text{ g/cm}^3$) e custo reduzido. Sua leveza favorece aplicações em linhas de transmissão elétrica e estruturas que exigem redução de peso. Apesar de ter menor resistência mecânica (90–150 MPa), o alumínio apresenta excelente resistência à oxidação superficial, formando naturalmente uma camada protetora de óxido (MARQUES et al., 2011; BROOKS, 1988).

O bronze (Cu-Sn), uma liga composta principalmente por cobre e estanho, possui condutividade elétrica que varia entre 15% e 37% IACS, a depender da concentração de estanho e do processamento térmico. Apesar da menor condutividade, o bronze é reconhecido por sua alta resistência ao desgaste, boa resistência mecânica (300–600 MPa) e excelente comportamento em ambientes corrosivos. É amplamente utilizado em buchas, engrenagens e conexões elétricas com exigência estrutural (CARRIÓ et al., 2010).

O latão (Cu-Zn) apresenta condutividade elétrica entre 28% e 35% IACS, também inferior à dos metais puros, mas suficiente para diversas aplicações elétricas e mecânicas. Sua resistência mecânica gira em torno de 300 a 500 MPa, e destaca-se pela boa usinabilidade, resistência à corrosão e aparência estética. O latão é amplamente empregado em conectores, pinos elétricos, instrumentos musicais e peças decorativas (MONTEIRO et al., 2010).

Tabela 1: Comparativo entre materiais quanto às suas propriedades.

Material	Condutividade Elétrica (% IACS)	Densidade (g/cm ³)	Resistência Mecânica (Mpa)
Cobre (Cu)	100	8,96	210-250
Alumínio (Al)	61	2,70	90-150
Bronze (Cu-Sn)	15-37	8,80	300-600
Latão (Cu-Zn)	28-35	8,40	300-500

Fonte: Adaptado de Marques et al. (2011); Monteiro et al. (2010); Carrió et al. (2009); Lopes (2018).

6. CONCLUSÕES

A partir da análise comparativa da condutividade elétrica dos metais puros (cobre e alumínio) e das ligas metálicas (latão e bronze), observou-se que os metais puros apresentam desempenho superior em termos de condução elétrica, sendo o cobre o padrão de referência industrial com 100% IACS. O alumínio, embora apresente condutividade reduzida em relação ao cobre, destaca-se por sua leveza, menor custo e resistência à oxidação, sendo amplamente utilizado em aplicações de grande escala e estruturas de transmissão de energia.

As ligas metálicas, por sua vez, apresentaram condutividade significativamente inferior, com valores que variam de 15% a 37% IACS para o bronze e de 28% a 35% para o latão. Apesar disso, essas ligas oferecem benefícios importantes como maior resistência mecânica, durabilidade, resistência ao desgaste e à corrosão, além de boa usinabilidade. Tais características justificam sua aplicação em componentes elétricos e mecânicos que exigem maior robustez e confiabilidade estrutural.

Conclui-se, portanto, que a escolha do material condutor deve ser feita com base em uma análise integrada de propriedades elétricas, mecânicas e econômicas. Enquanto os metais puros são preferidos quando se busca máxima eficiência elétrica, as ligas metálicas se mostram mais adequadas quando há necessidade de resistência mecânica e condições operacionais severas. A revisão bibliográfica demonstrou ainda que o tratamento térmico e o tipo de processamento influenciam significativamente essas propriedades, abrindo espaço para futuras otimizações no desenvolvimento de materiais condutores de alta performance.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao professor Weverson dos Santos Cirino, docente da disciplina Materiais Elétricos da Universidade do Estado do Amazonas (UEA), pela orientação, incentivo e disponibilidade ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BROOKS, C. S. Copper and Its Alloys. New York: Wiley, 1988.

CARRIÓ, J. A. G. et al. Microstructural and electrical investigation of Cu-Ni-Cr alloys obtained by powder metallurgy method. Materials Science Forum, v. 660-661, p. 35-40, 2010. Disponível em: <https://www.scientific.net/MSF.660-661.35>. Acesso em: 11 jun. 2025.

LOPES, D. S. Análise da condutividade elétrica por meio do ensaio de correntes parasitas da liga Waspaloy submetida a tratamentos térmicos. 2018. 74 f. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

MARQUES, I. M.; OKAZAKI, A. K.; SILVEIRA, C. R. da; CARVALHAL, M. A.; MONTEIRO, W. A.; CARRIÓ, J. A. G. Structural and microstructural comparative analysis on metallic alloys of composition Cu-Y%/Ni-X%/Me (Me = Sn, Cr, Al, Pt). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS – CBECIMAT, 19., 2010, Campos do Jordão, SP. Anais [...]. São Paulo: SBECIMAT, 2010.

MONTEIRO, W. A. et al. Desenvolvimento de micro e nanoestruturas em ligas metálicas à base de cobre visando alta condutividade elétrica. Relatório Técnico-Científico. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2011.

Capítulo 8

ESTUDO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ENVOLVIDOS NO DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO DE SPDA'S

DOI: 10.51859/amplla.wme212.1125-8

Luiz V. S. Moraes ¹

Daniel A. Rodrigues ²

Weverson dos Santos Cirino ³

¹ Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, CEP 69005-010

BRA; (e-mail: lvdsdm.eng19@uea.edu.br)

² Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, CEP 69005-010

BRA; (e-mail: dar.eng22@uea.edu.br)

³ Professor Efetivo do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Rio Umatumã, n 312, Conjunto Colina do Aleixo, Bairro São José Operário I, CEP: 69085-286
Manaus, AM, Brasil, E-mail: wdsantos@uea.edu.br

Resumo: Um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) se faz necessários em lugares onde a incidência de raios é elevada, sua ação depende diretamente do seu dimensionamento físico, desde as técnicas utilizadas até quais materiais serão utilizados na implementação, fatores como condutividade, resistência à corrosão, e resistência térmica e custo são de suma importância para que um projeto deste tipo de sistema atenda as necessidades do lugar onde será implementado sem trazer muitos custos de manutenção posteriormente.

Palavras-chaves: SPDA; Materiais; Resistência; Condutividade.

Abstract: Lightning Protection Systems (LPS) are made necessary where there is a high rate of lightning strikes, its efficiency depends directly on its physical characteristics, ranging from the techniques used for catching and dissipating the strikes, to which materials will be used. Material characteristics such as corrosion resistance, conductivity, thermal resistance and cost are extremely important to ensure that you have an efficient system that works for your project and place where it will be implemented, without bringing much maintenance costs later on.

Keywords: LPS; Materials; Resistance; Conductivity.

1. INTRODUÇÃO

Descargas Atmosféricas ou Raios, é um fenômeno atmosférico que ocorre quando a diferença de carga do chão para as nuvens fica muito grande, quebrando a capacidade do ar de agir como isolante e descarregando a eletricidade. Estas descargas elétricas são perigosas tanto para pessoas ao ar livre, quanto a construções e equipamentos, visto que a tensão de um raio pode chegar até 3 Mega Volts, fazendo-se necessária a existência de soluções de proteção contra essas descargas.

O dimensionamento de um sistema de proteção envolve saber onde vai ser instalado o sistema, definir uma distância de segurança, e definir bem os materiais que serão utilizados em cada parte do sistema, caso alguma dessas partes esteja mal dimensionada, o sistema pode

falhar, necessitar de manutenção mais constante do que o normal, ou até mesmo se deteriorar após um tempo.

2. SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

SPDA ou Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas, são sistemas de proteção focados em direcionar e dissipar descargas atmosféricas por um caminho seguro até a terra, minimizando danos a pessoas, edifícios, tanques e demais construções, seres-vivos e equipamentos. Estes sistemas são geralmente compostos de uma captação, um caminho, ou sistema de descida, e um sistema de aterramento.

2.1. Subsistema de Captação

O sistema de captação geralmente é confundido como sendo o SPDA todo, o chamado para-raios, porém esta é apenas uma das partes que compõem o sistema. Sistemas de captação são responsáveis, como o nome diz, captação da descarga atmosférica, fazendo com que a descarga que iria atingir um volume protegido, atinja o captador.

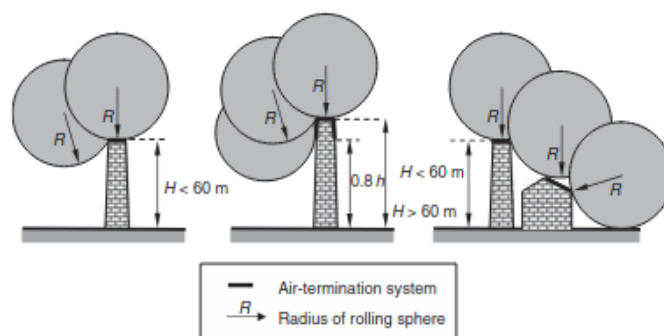
Os captadores podem ser constituídos de uma combinação de diversos elementos, dentre eles, hastes, cabos esticados, condutores em malha, e elementos naturais. Há várias técnicas para sua captação utilizando estas combinações, como o método de Franklin, Malhas e Esfera Rolante, sendo os métodos de malha e esfera rolante aplicáveis em todos os casos.

O método Franklin ou método do ângulo de proteção, consiste em um mastro de metal, emergindo do ponto mais alto do volume de proteção, para este método, a área de proteção será um cone iniciando da ponta do mastro até uma certa altura, esta técnica se faz ideal para construções de formato simples, onde o volume de proteção deste cone consegue englobar toda a construção sem muito problema, este método também falha em estruturas muito altas, acima de 60 metros de altura, pois incidências laterais podem ocorrer com frequência, nestes casos, é recomendado o uso de algum outro método.

O método da esfera rolante é projetado levando em conta uma esfera imaginária de raio R , que irá rolar ao redor de um ponto de contato no volume em todas as direções possíveis, assim, a esfera só toca o ponto de captação, que será o ponto onde as descargas irão atingir.

Ao contrário do método de Franklin, este método consegue proteger construções acima de 60 metros de altura, pois ao calcular todos os pontos onde a esfera rolante terá contato com a superfície do volume, basta implementar o sistema levando em consideração estes pontos de contato.

Figura 1 - Aplicação do Método da Esfera Rolante, imagem retirada do livro Lightning Protection de Cooray, V.



Fonte: (Cooray, 2010)

O método da malha ou Gaiola de Faraday, consiste em posicionar uma malha de metal em superfícies planas, ajustando as dimensões desta malha para o nível de proteção desejado, com este método, a corrente da descarga irá sempre encontrar caminhos para a descida até a terra, caso haja alguma protuberância metálica que saia do volume a ser protegido, esta deve ser conectada ao sistema para que não haja redirecionamentos incorretos.

2.2. Subsistema de Descida

O subsistema de descida é responsável por transportar a corrente de descarga atmosférica para o sistema de aterramento, providenciando caminhos em paralelo priorizando o menor caminho possível até a terra.

Este subsistema pode ser composto da estrutura metálica, de torres, postes, ou armaduras de aço, podendo também ser implantado externamente a estrutura, distribuindo os condutores de descida ao longo do perímetro do volume a ser protegido, com seus condutores seguindo a menor distância possível, com interligações horizontais em intervalos de 10 à 20 metros e ao nível do solo, não podendo ser instalados em calhas ou tubulações de águas pluviais.

2.3. Subsistema de Aterramento

O subsistema de aterramento consiste na etapa final do SPDA, onde a corrente de descarga irá finalmente ser aterrada e dispersa no solo. É extremamente importante que a geometria e dimensões deste sistema sejam bem estudados e planejados, pois além de minimizar sobretensões, deve-se também obter a menor resistência de aterramento possível, de acordo com o arranjo do eletrodo, topologia e resistividade do solo local.

3. CONDUTIVIDADE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Para entender como essas 2 propriedades influenciam o funcionamento e a eficácia de SPDA's, é preciso primeiramente entender os seguintes conceitos fundamentais: Condutividade

Elétrica, que é a capacidade de um material de conduzir corrente elétrica, onde uma condutividade mais alta garante uma dispersão eficiente da corrente de raios, e a Resistividade Elétrica, o inverso da condutividade, onde uma resistividade mais baixa minimiza as perdas de energia e o aquecimento por efeito Joule.

3.1. Comparação de materiais quanto à condutividade e resistividade

Tabela 1 - Comparativo de Condutividade e Resistividade.

Material	Condutividade (MS/m)	Resistividade ($\Omega \cdot m$)	Conformidade com a Norma
Cobre (Puro)	58.0	1.68×10^{-8}	IEC 62305, NBR 5419
Alumínio	37.7	2.65×10^{-8}	IEC 62305, NBR 5419
Aço Galvanizado	~ 10.0	$\sim 1.0 \times 10^{-7}$	IEC 62305, NBR 5419
Aço Revestido de Cobre	$\sim 20,0$ (varia)	$\sim 1.0 \times 10^{-7}$	IEC 62305

Fonte: Os próprios autores.

Do ponto de vista puramente elétrico, o cobre puro é a escolha ideal para SPDA's devido à sua condutividade incomparável e resistividade mínima. O alumínio segue como uma alternativa razoável, enquanto o aço revestido de cobre oferece uma solução intermediária. O aço galvanizado, embora mecanicamente robusto, apresenta o pior desempenho elétrico, exigindo adaptações de projeto (por exemplo, seções transversais maiores) para compensar sua maior resistência.

A seleção de materiais para SPDA's deve equilibrar condutividade, resistividade, resistência mecânica e resistência à corrosão. Embora o cobre permaneça ideal para sistemas de alto desempenho, alternativas como alumínio e aço revestido de cobre fornecem soluções econômicas.

3.2. Requerimentos das normas NBR 5419 e IEC 62305

A IEC 62305 serve como referência global, enquanto a NBR 5419 adapta seus princípios às condições ambientais do Brasil, particularmente em relação à corrosão e à resistividade do solo.

3.2.1. Requerimentos materiais

A IEC 62305-3 (2010) especifica as áreas mínimas de seção transversal para condutores: Cobre: 50 mm^2 (sólido) / 50 mm^2 (encordoadado) Alumínio: 70 mm^2 (sólido) / 70 mm^2 (encordoadado) Aço: 50 mm^2 (galvanizado).

A NBR 5419 (2015) está em estreita sintonia com a IEC, mas inclui adaptações locais adicionais: Permite seções transversais menores (por exemplo, 35 mm^2 para cobre) em certos

cenários de baixo risco. Enfatiza a resistência à corrosão em regiões costeiras, recomendando galvanização mais espessa para componentes de aço.

3.2.2. Considerações de Resistividade no Aterramento

Ambas as normas exigem sistemas de aterramento de baixa resistividade, mas diferem nas recomendações de tratamento do solo. A IEC 62305-4 sugere eletrodos químicos (por exemplo, bentonita, concreto condutivo) para solos de alta resistividade ($> 500 \Omega \cdot m$). Já a NBR 5419 exige eletrodos verticais adicionais em solos tropicais, onde as variações sazonais de resistividade são significativas.

4. RESISTÊNCIA À CORROSÃO

SPDA's estão sujeitos a condições severas de ambiente, como umidade, sal em áreas litorâneas, poluentes, flutuações de temperatura, tudo isso pode degradar o material utilizado, fazendo com que sua eficácia baixe significativamente e o sistema que deveria ser algo para proteção, acaba aumentando riscos de fogo, riscos estruturais, além de aumentar bastante os gastos com manutenção.

4.1. Tipos de Corrosão em Materiais Utilizados em SPDA's

Corrosão Galvânica ocorre quando dois metais diferentes estão em contato e na presença de um eletrólito como água da chuva, o metal mais anódico irá corroer rápido enquanto o catódico permanecerá protegido.

Corrosão atmosférica é causada pela exposição a oxigênio, umidade e poluentes, geralmente sendo a causa de oxidação dos materiais, ela varia bastante de acordo com a localização onde o material é exposto, sendo classificada pela ISO 9223 com um total de 6 categorias sendo determinadas pelas perdas por corrosão durante o primeiro ano de exposição de um material.

Tabela 2 - Categorias de Corrosividade ISO 9223.

Categoria	Corrosividade
C1	Muito Baixa
C2	Baixa
C3	Médio
C4	Alto
C5	Muito Alto
CX	Extremo

Fonte: ISO 9223.

Corrosão induzida pelo solo ocorre nos eletrodos de aterramento, onde o solo induz uma corrosão química nos materiais dependendo de vários fatores como seu pH, acidez, nível de aeração, presença de certas bactérias em sua composição, entre outros.

4.2. Comparativo de Materiais no sentido de resistência a corrosão

O catálogo de corrosão atmosférica em campos de exposição da europa, publicado pela European Federation of Corrosion, ou Federação Europeia de Corrosão, inclui uma tabela comparativa de Aço, Zinco, Cobre e Alumínio, em diferentes ambientes, como urbano, industrial, rural, marítimo e alta incidência de radiação UV.

Figura 2 - Parte da tabela presente no catálogo de corrosão atmosférica em campos de exposição da Europa.

No.	Site name	Atmosphere	Corrosion rate [g/m ² year]			
			Steel	Zinc	Copper	Aluminium
1	AT, Linz	Urban, Industrial	106	11.4	8.2	0.3
2	CZ, Kasperske Hory	Rural	53	4.5	8.7	0.01
3	CZ, Kopisty	Industrial	131	4.9	11.9	0.2
4	CZ, Kralupy	Urban	41	2.0	5.0	0.1
5	CZ, Ostrava	Industrial	164	10.0		
6	CZ, Prague	Urban	56	3.1	3.1	0.1
7	DE, Berlin A103	Urban	159	4.9	14.0	1.1
8	DE, Berlin B1	Urban	38	4.3	15.9	0.2
9	DE, Berlin BAM	Urban	56	5.3	9.1	0.2
10	DE, Helgoland IFAM	Marine	2390			
11	DE, Helgoland Seawater	Marine	2376	60.0	62.5	1.9
12	DE, Helgoland Südhafen	Marine	251	24.5	22.3	0.5
13	DE, Helgoland Uplands	Marine		8.5		
14	DE, Helgoland Seawater IFAM	Marine	2084	21.0	89.0	3.3
15	DE, Helgoland-Westkaje	Marine	296	10.5	13.5	0.4
16	DE, Horstwalde	Rural	44	4.0	19.7	0.1
17	DE, Leuchtturm alte Weser IFAM	Marine				
18	DE, Sylt Seawater IFAM	Marine			87.0	
19	ES, Barcelona	Rural, Urban	53	6.5		
20	FR, Brest	Marine	750	11.0	20.0	0.6
21	FR, Le Croisty	Rural	140	9.0	7.0	0.2
22	GR, Athens	Urban	77	6.4	5.0	0.1
23	IT, Genoa	Marine, Urban	130	11.0	14.0	1.1
24	IT, Milano	Urban			4.5	
25	IT, Monte Cimone	High UV				
26	IT, Plateau Rosa	High UV				
27	IT, Trento	Urban				
28	NQ, Birkenes	Rural	58	8.1	7.6	0.4
29	NQ, Oslo	Urban	19	5.8	3.5	
30	NQ, Svanvik	Rural, Industrial	69	7.9	7.9	0.7
31	NQ, Tananger	Marine	600			
32	PL, Katowice	Urban	18	2.5	0.6	0.1
33	PT, Alfanzina	Marine	214	9.8	24.0	1.0
34	PT, Guincho	Marine			61.0	
35	PT, Lisbon	Urban		9.5	8.3	0.7
36	PT, Lumiar	Urban	147	7.0	12.0	0.2
37	PT, Sines	Marine/Industrial	928	45.0	57.0	2.0

C1	C1	C1	C1
C2	C2	C2	C2
C3	C3	C3	C3
C4	C4	C4	C4
C5	C5	C5	C5
CX	CX	CX	CX

Fonte: (European Federation of Corrosion, 2021).

Nesta tabela é possível perceber coisas importantes sobre estes materiais, como por exemplo o cobre sofrendo níveis extremos (CX) de corrosão quando exposto à ambientes próximos ao mar, chegando a perder cerca de 9 g/m^3 por ano. Assim como é possível notar também o alto nível de resiliência que o alumínio tem a estes mesmos ambientes, sendo sua maior taxa de perda apenas $3,3 \text{ g/m}^3$ por ano, no mesmo ambiente onde foi registrado a maior taxa de corrosão no cobre.

4.3. Requerimentos das normas NBR 5419 e IEC 62305

A norma estabelece recomendações para a condição de utilização dos materiais, como evitar combinação de materiais para que seja minimizada a corrosão galvânica, e não implementar condutores de descida em calhas ou tubulações de águas pluviais, pois a água pode causar uma eventual corrosão.

Tabela 3 - Comparativo de Materiais quanto à Resistência a Corrosão (NBR 5419-3).

Material	Resistência à corrosão	Corrosão aumentado por:	Podem ser destruídos por acoplamento galvânico
Cobre	Boa em muitos ambientes	Compostos sulfurados, Materiais orgânicos, Altos conteúdos de cloretos	-----
Aço Galvanizado Quente	Aceitável no ar, em concreto e solos salubres	Altos conteúdos de cloretos	Cobre
Aço Inoxidável	Boa em muitos ambientes	Altos conteúdos de cloretos	-----
Aço Revestido por Cobre	Boa em muitos ambientes	Compostos sulfurados	-----
Alumínio	Boa em atmosferas contendo baixas concentrações de sulfurados e cloretos	Soluções alcalinas	Cobre

Fonte: Adaptado de (NBR 5419-3, 2015).

5. PROPRIEDADES TÉRMICAS E DISSIPAÇÃO DE CALOR

O desempenho térmico dos materiais usados em SPDA's é regido por três propriedades principais que determinam o quão bem eles suportam e dissipam o calor extremo gerado por raios (normalmente 5.000-30.000 °C por microssegundos): Ponto de fusão (PF): é a temperatura na qual um material passa de sólido para líquido; Condutividade Térmica (k): Capacidade de conduzir calor; Coeficiente de Expansão Térmica (CET): Taxa de variação dimensional por °C.

Embora menos significantes, outras propriedades adicionais também podem influenciar no desempenho térmico dos materiais, como: Calor específico, Difusividade térmica e Temperatura de recristalização.

Materiais ideais para uso em SPDA's combinam as seguintes características: alto Ponto de Fusão (integridade estrutural), alta Condutividade Térmica (dissipação de calor) e Coeficiente de Expansão Térmica moderado (estabilidade articular).

5.1. Desempenho de dissipação de calor sob correntes proveniente de raios

Quando um raio (por exemplo, 100 kA, 100 µs) passa por um condutor de SPDA, o calor gerado (Q) segue a fórmula:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (\text{equação 1})$$

onde:

I = Corrente (A);

R = Resistência (Ω), dependente da resistividade (ρ);

t = Tempo(s).

Analisando a fórmula, pode-se concluir a relação entre a resistividade (ρ) e a capacidade dissipação de calor de um material. Menor resistividade gera menos calor e o dissipa mais rapidamente. Já maior resistividade retém o calor por mais tempo, aumentando o risco de estresse térmico.

Outros fatores importantes como Estresse Térmico e Fadiga nos materiais podem ser analisados a partir de suas propriedades térmicas. No Cobre e Alumínio, a alta condutividade térmica reduz os gradientes térmicos, minimizando a fadiga. Já o maior CET do alumínio pode causar afrouxamento das juntas ao longo do tempo. Em materiais à base de Aço, a baixa condutividade térmica leva a um aquecimento desigual, aumentando o risco de rachaduras, enquanto aço revestido de cobre atenua esse problema devido à sua camada externa condutora.

5.2. Comparativo de Materiais quanto às propriedades térmicas

Tabela 4 - Comparativo de Materiais quanto às Propriedades Térmicas.

Material	Condutividade térmica (W/m·K)	Ponto de fusão (°C)	Eficiência de dissipação de calor	Risco de estresse térmico
Cobre	401 (melhor)	1083	Excelente	Baixo
Alumínio	237 (bom)	660	Bom	Moderado (CET alto)
Aço revestido de Cobre	~ 200 (intermediário)	1083 (Cu) / 1510 (Fe)	Bom	Baixo-Moderado
Aço galvanizado	~ 50 (ruim)	419 (Zn) / 1510 (Fe)	Ruim	Alto

Fonte: Os próprios autores.

O cobre é o material com melhor desempenho para gerenciamento térmico devido à sua condutividade excepcional e alto ponto de fusão. O alumínio é uma alternativa viável, mas apresenta menor estabilidade térmica em condições extremas. O aço revestido de cobre oferece uma solução equilibrada, combinando dissipação de calor com resistência estrutural. O aço

galvanizado apresenta baixa dissipação de calor, tornando-o menos adequado para descargas atmosféricas de alta energia, a menos que seja complementado com medidas de projeto de resfriamento.

5.3. Requerimentos das normas NBR 5419 e IEC 62305

Tanto a IEC 62305 quanto a NBR 5419 reconhecem as propriedades térmicas como fatores críticos no projeto de SPDA, mas com ênfases diferentes.

As normas mostram talvez sua divergência mais pronunciada nos requisitos de eletrodos de aterramento. Enquanto a IEC mantém uma profundidade mínima universal de enterramento de 0,5 m, a NBR estende essa profundidade para 0,8 m para condições de solo tropical, a fim de garantir um desempenho térmico estável durante todo o ano. Além disso, enquanto a IEC trata medidas de resfriamento do solo como elementos opcionais de projeto, a NBR as torna obrigatórias sempre que as temperaturas do solo excederem 50 °C – uma ocorrência comum em muitas regiões brasileiras. Essas disposições refletem a adaptação da NBR a fatores ambientais locais que podem afetar drasticamente o comportamento térmico dos sistemas de aterramento.

6. CONCLUSÕES

É notável a importância de uma boa seleção de materiais em um dimensionamento de SPDA, visto que condutividade elétrica não é o único fator a ser considerado, pode-se perceber que os demais fatores como a corrosão e propriedades térmicas do material devem ser devidamente pensadas para o local de aplicação e técnicas que serão utilizadas na implementação do sistema, para que este possa durar por um longo período sem muitos gastos em manutenção, e com a devida segurança.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT] (2015). NBR-5419 - Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas, Rio de Janeiro, BR.

Cooray, V. (2010). Lightning Protection, The Institution of Engineers and Technology (IET), London, UK.

European Federation of Corrosion: Exposure Site Catalogue - Catalogue of Atmospheric Corrosion Field Exposure Sites in Europe, 2021 - <https://efcweb.org/WP25.htm>.

Gomes, C. & Cooray, V. (2004). Electrostatic assist for coating: the effect of surface resistivity, pp. 31-42, Journal of Electrostatics Vol. 61.

International Electrotechnical Commission [IEC] (2010). IEC 62305 Protection Against Lightning, Geneva, CH.

International Electrotechnical Commission [IEC] (2011). IEC 62561 Lightning Protection System Components (LPSC), Geneva, CH.

International Organization for Standardization [ISO] (2012). ISO 9223: Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres - Classification, determination and estimation. Geneva, CH.

Marciniak. Robert, Loboda. Marek (2024). Corrosion of lightning protection system components placed in atmosphere (air) and in earth (soil), pp. 310-317 .37th International Conference on Lightning Protection, Dresden, DE.

Martin A. Uman (1987). The Lightning Discharge (International Geophysics Series). Academic Press, Incorporated, International geophysics series, Florida, US.

Capítulo 9

UMA ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA SOBRE MATERIAIS AVANÇADOS PARA ELETRÔNICA FLEXÍVEL: APLICAÇÃO DE GRAFENO, NANOTUBOS DE CARBONO E POLÍMEROS CONDUTORES EM DISPOSITIVOS FLEXÍVEIS (WEARABLES, TELAS DOBRÁVEIS)

DOI: 10.51859/ampla.wme212.1125-9

Edmundo Alves dos Santos Neto ¹

Eduardo Barbosa Caldeira ²

Kevin Carlos Tavares de Freitas ³

Weverson dos Santos Cirino ⁴

¹ Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

R. Monte Horebe, n 174, Tarumã, 69093-320:

Manaus, AM, Brasil, kctdf.eng22@uea.edu.br:

² Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

R. Alecrinzeiro, n 446, Tarumã, 69041712:

Manaus, AM, Brasil, eadsn.eng20@uea.edu.br:

³ Aluno do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

R. São Luís Beltrão, 319, Chapada, CEP:

Manaus, AM, Brasil, ebc.eng20@uea.edu.br:

⁴ Professor Efetivo do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Rua Rio Umatumã, n 312, Conjunto Colina do Aleixo, Bairro São José Operário I, CEP: 69085-286

Manaus, AM, Brasil, E-mail: wdsantos@uea.edu.br

Resumo: A eletrônica flexível vem ganhando destaque na vida cotidiana, com aplicações que vão desde relógios inteligentes até telas dobráveis e dispositivos vestíveis. No entanto, os materiais eletrônicos convencionais, como silício e metais rígidos, não suportam as exigências mecânicas desses dispositivos, como flexão, torção ou estiramento. Diante desse desafio, surgem materiais avançados como o grafeno, os nanotubos de carbono (CNTs) e os polímeros condutores, capazes de combinar alta condutividade elétrica com flexibilidade mecânica. Este artigo apresenta uma análise bibliográfica abrangente sobre esses materiais, discutindo suas rotas de fabricação, propriedades físico-químicas e principais aplicações em dispositivos flexíveis. Conclui-se que a contínua investigação e desenvolvimento desses materiais é essencial para viabilizar a próxima geração de eletrônicos inteligentes, leves e altamente adaptáveis.

Palavras-chaves: Eletrônica flexível, vestíveis (wearables), telas dobráveis, grafeno, nanotubos de carbono, polímeros condutores

Abstract: Flexible electronics have gained prominence in daily life, with applications ranging from smartwatches to foldable screens and wearable devices. However, conventional electronic materials, such as rigid silicon and metals, cannot withstand the mechanical demands of these systems, including bending, twisting, or stretching. In response to this challenge, advanced materials like graphene, carbon nanotubes (CNTs), and conductive polymers have emerged, offering a unique combination of high electrical conductivity and mechanical flexibility. This article presents a comprehensive bibliographic review of these materials, discussing their fabrication methods, physicochemical properties, and key applications in flexible devices. It concludes that continued research and development of these materials is essential to enable the next generation of intelligent, lightweight, and highly adaptable electronics.

Keywords: Flexible electronics, wearables, foldable screens, graphene, carbon nanotubes, conductive polymers.

1. INTRODUÇÃO

O que são Eletrônicos Flexíveis e porque são importantes atualmente? Eletrônicos flexíveis representam uma das fronteiras mais promissoras da tecnologia moderna. Diferente dos dispositivos eletrônicos tradicionais, que utilizam materiais rígidos e quebradiços, como silício e metais, os eletrônicos flexíveis são capazes de dobrar, esticar ou enrolar sem perder funcionalidade. Essa capacidade de adaptação a diferentes formas permite a criação de dispositivos mais leves, portáteis, resistentes e confortáveis.

As aplicações atuais e emergentes dessa tecnologia já são visíveis em diversos setores. Exemplos incluem celulares dobráveis, telas que se enrolam, sensores vestíveis incorporados a roupas ou adesivos de pele, equipamentos médicos mais confortáveis para monitoramento contínuo e até tecidos inteligentes que acompanham sinais vitais em tempo real. No futuro, espera-se que essa tecnologia esteja presente em superfícies inteligentes, implantes médicos avançados e sistemas eletrônicos integrados ao ambiente cotidiano.

Contudo, para que essas inovações se tornem realidade, é necessário superar uma limitação fundamental: os materiais tradicionalmente utilizados na fabricação de circuitos eletrônicos não toleram deformações mecânicas. Quando submetidos a dobramentos ou estiramentos, esses materiais podem trincar, quebrar ou perder suas propriedades elétricas, inviabilizando sua aplicação em dispositivos flexíveis.

Diante dessa limitação, surge a necessidade de desenvolver materiais que sejam, ao mesmo tempo, eletricamente condutores e mecanicamente flexíveis. Esses materiais devem ser leves, duráveis, resistentes à fadiga mecânica e compatíveis com métodos modernos de fabricação em larga escala.

Três classes de materiais vêm se destacando nesse cenário: o grafeno, os nanotubos de carbono (CNTs) e os polímeros condutores. O grafeno e os CNTs são materiais à base de carbono com propriedades excepcionais de condutividade elétrica, resistência mecânica e flexibilidade. Já os polímeros condutores, como o PEDOT: PSS e a polianilina, combinam a facilidade de processamento dos plásticos com a capacidade de transportar cargas elétricas.

Esses materiais avançados constituem a base da próxima geração de eletrônicos inteligentes e flexíveis, impulsionando inovações em áreas como saúde, energia, comunicação, vestíveis e tecnologia assistiva.

2. GRAFENO E SEUS DERIVADOS

O grafeno é uma única camada atômica de átomos de carbono dispostos em uma estrutura bidimensional com padrão hexagonal, semelhante a uma “rede de galinheiro”. Considerado o material mais fino já conhecido — com apenas um átomo de espessura — o grafeno revolucionou a ciência dos materiais desde sua primeira obtenção experimental em 2004, feito que rendeu o Prêmio Nobel de Física em 2010.

Entre suas propriedades excepcionais, destacam-se:

1. Condutividade elétrica elevada: os elétrons no grafeno se comportam como partículas relativísticas (quase sem massa), o que lhes permite se movimentar com altíssima mobilidade, superando a condutividade de muitos metais.
2. Altíssima resistência mecânica: é cerca de 200 vezes mais resistente que o aço, apesar de ser extremamente fino e leve.
3. Flexibilidade: pode ser dobrado ou esticado sem se romper, o que o torna ideal para dispositivos eletrônicos dobráveis ou vestíveis
4. Transparência óptica: absorve apenas ~2,3% da luz visível, permitindo sua utilização em telas, sensores ópticos e células solares.
5. Grande área superficial específica: possui cerca de 2.630 m²/g, o que o torna altamente promissor em sensores, supercapacitores e baterias.

Essas características colocam o grafeno como um dos principais candidatos a substituir ou complementar materiais eletrônicos tradicionais na próxima geração de dispositivos flexíveis.

2.1. Os parentes do Grafeno: GO e rGO

2.1.1. Óxido de Grafeno (GO)

O óxido de grafeno é uma forma funcionalizada do grafeno que contém grupos oxigenados (como epóxidos, hidroxilas e carboxilas) em sua superfície e bordas. Esses grupos tornam o GO altamente hidrofílico e dispersível em água, o que facilita sua incorporação em tintas, revestimentos e filmes por técnicas de processamento em solução.

Apesar da facilidade de processamento, o GO apresenta condutividade elétrica muito inferior ao grafeno puro, devido à interrupção da rede π -conjugada causada pela oxidação. Além disso, seu comportamento mecânico é mais frágil, limitando sua aplicação direta em dispositivos de alta performance elétrica.

2.1.2. Óxido de Grafeno Reduzido (rGO)

O óxido de grafeno reduzido é obtido a partir do GO por meio de tratamentos químicos, térmicos ou eletroquímicos que visam remover os grupos oxigenados e restaurar parcialmente

a estrutura do grafeno original. O resultado é um material com propriedades intermediárias entre o GO e o grafeno: com condutividade elétrica melhorada, boa flexibilidade e relativa facilidade de fabricação.

Embora o rGO não alcance as propriedades ideais do grafeno puro, sua síntese mais simples e compatibilidade com processos industriais tornam-no uma alternativa viável para diversas aplicações em eletrônica flexível.

2.2. O Desafio de Produzir Grafeno em Grande Escala

Apesar de suas propriedades notáveis, a principal limitação para a adoção ampla do grafeno em dispositivos comerciais está relacionada à sua fabricação em larga escala. Os métodos mais comuns, como esfoliação mecânica, crescimento por deposição química de vapor (CVD) e redução de GO, enfrentam desafios quanto à uniformidade, custo, pureza e controle de defeitos estruturais.

A obtenção de grafeno de alta qualidade, com boa reprodutibilidade e adaptável a processos industriais, ainda é um obstáculo técnico significativo. Superar essa barreira é essencial para transformar o grafeno de uma promessa laboratorial em um componente fundamental da eletrônica flexível do futuro.

3. NANOTUBOS DE CARBONO (CNTS)

Os nanotubos de carbono (CNTs) são estruturas cilíndricas ocas formadas por folhas de grafeno enroladas sobre si mesmas. Eles podem ser classificados em dois principais tipos: nanotubos de parede simples (SWCNTs, Single-Walled Carbon Nanotubes), compostos por uma única camada de grafeno, e nanotubos de múltiplas paredes (MWCNTs, Multi-Walled Carbon Nanotubes), compostos por várias camadas concêntricas.

Assim como o grafeno, os CNTs exibem propriedades extraordinárias, tanto elétricas quanto mecânicas. Em termos de condutividade elétrica, os CNTs podem se comportar como metais ou semicondutores, dependendo da orientação e do diâmetro do tubo. Além disso, apresentam alta resistência à tração e excelente estabilidade térmica e química. Essa combinação de características os torna materiais altamente promissores para uso em dispositivos eletrônicos flexíveis e de alto desempenho.

Os nanotubos de carbono são utilizados como materiais de reforço ou agentes condutores em compósitos poliméricos para eletrônica flexível. Ao serem incorporados em matrizes poliméricas, eles melhoram a condutividade elétrica do material e reforçam suas propriedades mecânicas, como resistência, elasticidade e durabilidade.

Entretanto, para que essas melhorias sejam efetivas, é fundamental que os CNTs sejam uniformemente dispersos dentro do material hospedeiro. Quando os nanotubos se aglomeram, o contato entre eles pode ser irregular, o que compromete tanto a condução elétrica quanto a integridade estrutural do compósito. Esse é um dos principais desafios no uso prático de CNTs.

Uma técnica comum para facilitar a dispersão homogênea dos CNTs é a ultrassonicação, que utiliza ondas sonoras de alta frequência para quebrar os aglomerados e distribuir os nanotubos de forma mais eficiente na solução ou matriz polimérica. Esse método é amplamente usado em laboratórios de pesquisa, especialmente em processos de preparação de tintas condutoras, filmes flexíveis e sensores baseados em compósitos de CNTs.

Além disso, os CNTs são compatíveis com diversos métodos de fabricação em solução, como impressão, spray coating e deposição por spin coating, tornando-os adequados para a produção em larga escala de eletrônicos flexíveis.

4. POLÍMEROS CONDUTORES

Polímeros condutores são materiais orgânicos que, ao contrário dos plásticos convencionais, possuem a capacidade de conduzir eletricidade. Eles combinam duas qualidades essenciais para a eletrônica flexível: a leveza, elasticidade e facilidade de processamento dos polímeros com a condutividade elétrica típica de metais. Essa combinação os torna ideais para dispositivos que precisam ser dobráveis, esticáveis ou moldados em formatos não convencionais.

Entre os exemplos mais estudados e aplicados estão:

- Polianilina (PANI)
- Polipirrol (PPy)
- Poli(3,4-etilenedioxitiofeno) (PEDOT), geralmente usados na forma PEDOT:PSS

Esses materiais têm sido amplamente explorados em sensores, atuadores, células solares orgânicas, displays e eletrodos transparentes.

A condutividade elétrica dos polímeros condutores está relacionada à estrutura de ligações duplas conjugadas em sua cadeia de átomos de carbono. Essas ligações permitem a deslocalização dos elétrons π , criando canais para que os elétrons se movimentem ao longo da cadeia polimérica. No entanto, para que essa condução seja eficiente, os polímeros muitas vezes precisam passar por um processo chamado dopagem, no qual são adicionadas substâncias que aumentam a quantidade de portadores de carga.

Em compósitos poliméricos, onde partículas condutoras como grafeno ou nanotubos de carbono são dispersas em uma matriz polimérica, a condução também pode ocorrer por meio

do efeito túnel, um fenômeno quântico onde elétrons conseguem "saltar" entre partículas muito próximas, mesmo que não estejam fisicamente conectadas. A seguir são descritos alguns tipos de polímeros condutores e seus usos.

4.1. P3HT (Poli(3-hexiltiofeno))

Trata-se de um semicondutor orgânico que se destaca pela facilidade de síntese, baixo custo e boas propriedades optoeletrônicas. É amplamente utilizado em células solares flexíveis, transistores orgânicos e telas flexíveis.

4.2. PEDOT: PSS

Um dos polímeros condutores mais utilizados atualmente. Apresenta excelente transparência ótica, boa condutividade elétrica e é compatível com processos de impressão e deposição em solução. Por isso, é frequentemente empregado como eletrodo transparente em OLEDs, sensores, células solares e dispositivos vestíveis.

Contudo, o PEDOT:PSS apresenta baixa estirabilidade, e sua condutividade pode diminuir sob deformações mecânicas, exigindo otimizações como adição de plastificantes ou formação de compósitos.

4.3. Compósitos de PDMS (Polidimetilsiloxano)

O PDMS é um elastômero transparente, biocompatível e altamente elástico. Quando misturado a materiais condutores (como CNTs, grafeno ou partículas metálicas), torna-se um compósito funcional ideal para peles eletrônicas, sensores de pressão e interfaces táteis flexíveis. A matriz de PDMS fornece elasticidade, enquanto os aditivos garantem a condutividade elétrica.

4.4. Compósitos de TPU (Poliuretano Termoplástico)

O TPU é outro elastômero amplamente usado na eletrônica flexível por sua resiliência mecânica, alta estirabilidade e boa compatibilidade com dopantes condutores. Compósitos de TPU com CNTs ou grafeno são utilizados em sensores de pressão, monitores corporais vestíveis e dispositivos inteligentes dobráveis, destacando-se por manterem desempenho estável mesmo após múltiplos ciclos de deformação.

5. COMO FABRICAR ELETRÔNICOS FLEXÍVEIS

A fabricação de eletrônicos flexíveis envolve não apenas o desenvolvimento de materiais condutores avançados, mas também a escolha de métodos apropriados para sua síntese, aplicação em substratos flexíveis e integração com outros componentes. Esta seção apresenta as principais abordagens utilizadas para criar dispositivos eletrônicos flexíveis em escala de laboratório e industrial.

5.1. Polimerização Química:

Consiste na reação entre monômeros e agentes oxidantes em solução, gerando polímeros condutores como PANI, PPy e PEDOT. É um método simples e adequado para produção em larga escala.

5.2. Polimerização Eletroquímica:

Os monômeros são depositados diretamente sobre um eletrodo por meio de corrente elétrica, permitindo controle preciso sobre a espessura e morfologia do filme condutor. Essa técnica é amplamente utilizada para sensores e microdispositivos.

5.3. Deposição Química de Vapor (CVD):

Muito usada na fabricação de grafeno, envolve a decomposição de gases contendo carbono (como metano) sobre substratos metálicos aquecidos, formando camadas de grafeno de alta qualidade. É promissora para aplicações industriais, mas ainda enfrenta desafios em custo e escalabilidade.

5.4. Redução de Óxido de Grafeno (GO):

O óxido de grafeno (GO) pode ser facilmente disperso em água, aplicado sobre superfícies flexíveis e, posteriormente, reduzido quimicamente ou termicamente para formar o óxido de grafeno reduzido (rGO), com melhores propriedades condutoras. Essa abordagem é econômica e compatível com diversas técnicas de impressão.

5.5. Técnicas para Aplicar os Materiais em Formas Flexíveis

5.5.1. Impressão por Jato de Tinta (Inkjet) e Serigrafia (Screen Printing):

Métodos que permitem a deposição precisa de tintas condutoras (com polímeros, grafeno ou CNTs) sobre substratos flexíveis. São compatíveis com produção contínua (roll-to-roll) e permitem customização de padrões em grande escala.

5.5.2. Dip Coating (Revestimento por Imersão):

O substrato é mergulhado em uma solução contendo o material condutor. Ao ser retirado e seco, forma-se um filme fino sobre sua superfície. É simples, barato e ideal para revestimento de tecidos, espumas e superfícies porosas.

5.5.3. Spray Coating (Revestimento por Pulverização):

A tinta é pulverizada sobre o substrato, promovendo uma aplicação uniforme, mesmo em superfícies grandes e planas. Essa técnica é adequada para a fabricação de sensores e eletrodos transparentes.

6. APLICAÇÕES EM ELETRÔNICOS FLEXÍVEIS

A evolução dos materiais avançados, como grafeno, nanotubos de carbono e polímeros condutores, tem impulsionado o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos que vão além da rigidez tradicional. Esta seção apresenta algumas das aplicações mais promissoras e já em uso dos eletrônicos flexíveis.

6.1. Telas Flexíveis e Dobráveis (OLEDs)

Os OLEDs (diodos emissores de luz orgânicos) representam a base tecnológica das telas dobráveis e enroláveis atuais. Elas são mais finas, leves, brilhantes e consomem menos energia do que telas convencionais.

Um dos avanços mais significativos nessa área é a substituição do tradicional óxido de índio-estanho (ITO), usado como eletrodo transparente, pelo grafeno, devido às suas vantagens superiores:

- Alta flexibilidade mecânica, permitindo que a tela seja dobrada milhares de vezes sem falhas;
- Excelente transparência ótica, essencial para displays;
- Elevada condutividade elétrica;
- Maior durabilidade, especialmente em condições adversas.

Com isso, telas com grafeno vêm se tornando cada vez mais viáveis em celulares, tablets, TVs flexíveis e painéis interativos.

6.2. Sensores Vestíveis e Biomédicos

6.2.1. Sensores de Deformação e Toque

Materiais flexíveis condutores podem alterar sua resistência elétrica quando submetidos a deformações mecânicas, como estiramento ou pressão. Isso os torna ideais para:

- Luvas inteligentes para controle de robôs;
- "Pele eletrônica" sensível ao toque e à temperatura;
- Sensores vestíveis que monitoram batimentos cardíacos, respiração e movimentos articulares em tempo real.

Esses dispositivos são especialmente úteis na reabilitação física, interfaces homem-máquina e controle por gestos.

6.2.2. Sensores Médicos Avançados

Grafeno e polímeros condutores também estão sendo aplicados em sensores biomédicos mais sofisticados, como:

- Adesivos cutâneos que medem hidratação, pH da pele ou eletrólitos;
- Lentes de contato inteligentes, que detectam glicose nas lágrimas — uma aplicação relevante no monitoramento contínuo do diabetes.

Esses sensores são leves, confortáveis e podem operar por longos períodos em contato com o corpo humano.

6.3. Dispositivos de Geração e Armazenamento de Energia

6.3.1. Supercapacitores Flexíveis

Supercapacitores são dispositivos de armazenamento de energia que oferecem altas densidades de potência e rápidos ciclos de carga e descarga. São ideais para aplicações em:

- Dispositivos vestíveis;
- Sistemas portáteis que exigem picos de energia.

Materiais como grafeno, MXenes e CNTs são utilizados como eletrodos nesses supercapacitores, graças à sua:

- Alta área superficial específica;
- Boa estabilidade eletroquímica;
- Flexibilidade estrutural.

6.3.2. Geradores Termoelétricos Flexíveis

Dispositivos termoelétricos convertem diferenças de temperatura, como o calor do corpo humano, em eletricidade. Pesquisas recentes têm explorado:

- Polímeros condutores dopados com CNTs;
- Compósitos flexíveis baseados em grafeno e fibras naturais.

Esses geradores têm potencial para alimentar sensores de baixo consumo diretamente com o calor corporal, sem a necessidade de baterias.

6.4. Blindagem contra Interferência Eletromagnética (EMI)

Com o aumento do número de dispositivos eletrônicos pessoais, cresce também a preocupação com a interferência eletromagnética (EMI), que pode afetar o funcionamento de equipamentos eletrônicos sensíveis. Materiais condutores e leves, como grafeno e MXenes, são excelentes para blindagem EMI porque:

- Refletem ou absorvem ondas eletromagnéticas indesejadas;
- Podem ser incorporados em roupas, malas eletrônicas ou equipamentos flexíveis;
- Mantêm sua eficácia mesmo após dobramentos ou aplicações em superfícies curvas.

Essas soluções são especialmente relevantes para ambientes médicos, dispositivos portáteis e equipamentos militares.

7. DESAFIOS E O FUTURO DA ELETRÔNICA FLEXÍVEL

7.1. Obstáculos Atuais

7.1.1. Produção em Larga Escala:

A fabricação de materiais como grafeno e MXenes com alta qualidade, baixa taxa de defeitos e propriedades consistentes ainda é um desafio técnico. Muitos métodos são eficazes apenas em laboratório, mas não escaláveis para produção industrial.

7.1.2. Custo de Produção:

Apesar de algumas matérias-primas serem relativamente baratas, os processos de fabricação, purificação e aplicação desses materiais ainda envolvem custos elevados. Isso limita o uso comercial em produtos de baixo custo.

7.1.3. Durabilidade a Longo Prazo:

Para aplicações práticas, os materiais precisam manter suas propriedades elétricas e mecânicas mesmo após centenas ou milhares de ciclos de dobra, estiramento e exposição

ambiental (umidade, calor, radiação UV). Muitos compósitos ainda sofrem degradação com o tempo.

7.1.4. Adesão e Compatibilidade com Substratos:

Um dos maiores desafios é garantir que os materiais condutores formem interfaces estáveis com substratos flexíveis (como TPU ou PDMS), sem descolamento ou perda de performance ao longo do tempo.

7.1.5. Avaliação e Padronização:

Ainda não há protocolos padronizados para medir com precisão o desempenho de dispositivos eletrônicos sob condições reais de uso (ex. dobramentos cíclicos, estiramentos, ambientes úmidos). Isso dificulta a comparação entre estudos e o avanço tecnológico coordenado.

7.1.6. Estabilidade dos MXenes:

Embora promissores, os MXenes ainda enfrentam sérios problemas de oxidação em ambientes úmidos, o que afeta sua estabilidade elétrica e reduz sua aplicabilidade em longo prazo.

7.2. Perspectivas Futuras

O futuro da eletrônica flexível está fortemente ligado à inovação em materiais e processos. Avanços promissores envolvem o desenvolvimento de compósitos híbridos, como a combinação de grafeno com MXenes ou nanotubos de carbono com polímeros funcionais, capazes de oferecer desempenho superior em condutividade elétrica, flexibilidade e estabilidade ambiental. Além disso, o design molecular de novos polímeros condutores poderá permitir funcionalidades adicionais, como autorreparo, biodegradabilidade e resposta adaptativa ao ambiente, ampliando seu uso em dispositivos vestíveis e médicos. Na fabricação, espera-se a evolução de técnicas como impressão funcional e processos roll-to-roll, que possibilitem produção em larga escala de forma eficiente e econômica. A criação de padrões de teste específicos será fundamental para viabilizar a padronização, certificação e comercialização desses dispositivos em escala global. Também ganham destaque os dispositivos multifuncionais, capazes de executar várias funções simultâneas, como geração de energia, sensoriamento e blindagem eletromagnética, e os sistemas biointegráveis, que abrem caminho para aplicações médicas avançadas. Por fim, a busca por soluções mais sustentáveis deve impulsionar o uso de materiais ecologicamente corretos, reduzindo o impacto ambiental durante todo o ciclo de vida dos produtos eletrônicos.

8. CONCLUSÕES

A eletrônica flexível representa uma das fronteiras mais promissoras da tecnologia moderna, abrindo novas possibilidades para dispositivos leves, dobráveis, vestíveis e integráveis ao corpo humano. No entanto, seu avanço depende diretamente da superação das limitações impostas pelos materiais eletrônicos tradicionais. Nesse contexto, materiais avançados como o grafeno, os nanotubos de carbono (CNTs) e os polímeros condutores surgem como pilares fundamentais para essa revolução, oferecendo uma combinação rara de condutividade elétrica, flexibilidade mecânica, transparência, leveza e adaptabilidade.

Este artigo apresentou uma análise abrangente sobre esses materiais, abordando desde suas propriedades estruturais até suas aplicações práticas em sensores, telas, fontes de energia e blindagem eletromagnética. Também foram discutidos os desafios atuais relacionados à produção em larga escala, durabilidade e integração eficiente com substratos flexíveis. Apesar das dificuldades, as perspectivas são animadoras: com avanços contínuos em design molecular, técnicas de fabricação e desenvolvimento de compósitos híbridos, espera-se que esses materiais impulsionem a próxima geração de dispositivos eletrônicos inteligentes, multifuncionais, sustentáveis e biointegráveis. O investimento contínuo em pesquisa multidisciplinar será essencial para transformar essas possibilidades em realidade concreta, beneficiando setores como saúde, comunicação, energia e segurança.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade do Estado do Amazonas (UEA), em particular à Escola Superior de Tecnologia (EST) e ao curso de Engenharia Elétrica, pelo apoio institucional e pela infraestrutura para o desenvolvimento deste trabalho. Expressamos nossa gratidão ao Professor Weverson dos Santos Cirino, pela orientação e contribuições essenciais durante a elaboração deste artigo.

REFERÊNCIAS

- Bae, S., Kim, H., Lee, Y., et al. (2010). Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. *Nature Nanotechnology*, 5(8), 574-578.
- Callister, W.D. (2013). *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. Rio de Janeiro: LTC.
- Cataldi, P., D.G. Papageorgiou, G. Pinter, A.V. Kretinin, W.W. Sampson, R.J. Young, M. Bissett, I.A. Kinloch. (2020). Electrically Conductive Coatings for Flexible & Stretchable Electronics: A Comparative Review of Graphenes & MXenes. *Advanced Electronic Materials*, 6(8), 2000429.

- Cho, C., Wallace, K.L., Tzeng, P., Hsu, J.H., Yu, C., and Grunlan, J.C. (2016). Organic thermoelectric materials based on graphene. *Advanced Energy Materials*, 6(2), 1502168.
- Díez-Pascual, A.M. and Rahdar, A. (2022). Graphene-Based Polymer Composites for Flexible Electronic Applications. *Micromachines*, 13(7), 1123.
- Gogotsi, Y. and Anasori, B. (2019). MXenes: Synthesis, properties, and applications. *2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes) Structure, Properties and Applications*. Springer International Publishing.
- Hu, J., et al. (2020). Fundamentals of the Fibrous Materials. In Kumar, B.; Lu, J. (Eds.). *Handbook of fibrous materials*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Karim, N., et al. (2021). Sustainable and Multifunctional Composites of Graphene-Based Natural Jute Fibers. *Advanced Sustainable Systems*, 5(3), 2000228.
- Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S.V., Grigorieva, I.V., and Firsov, A.A. (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 306(5696), 666-669.
- Sahu, N. and Arif, R. (2024). Exploring Conductive Polymers for Flexible Electronics: Fabrication Techniques and Performance Analysis. *International Journal of Polymer Science & Engineering*, 10(1), 22-28.

