



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

JOÃO LUCAS OLIVEIRA DE ANDRADE

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS EFEITOS SEEBECK E PELTIER POTENCIAL
TERMOELÉTRICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA E REFRIGERAÇÃO**

PAU DOS FERROS/RN

2025

JOÃO LUCAS OLIVEIRA DE ANDRADE

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS EFEITOS SEEBECK E PELTIER POTENCIAL
TERMOELÉTRICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA E REFRIGERAÇÃO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Lino Martins de Holanda Junior,
Prof. Dr.

PAU DOS FERROS/RN

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A553a Andrade, João Lucas Oliveira de .
Análise experimental dos efeitos Seebeck e Peltier: potencial termoeletrico para geração de energia e refrigeração / João Lucas Oliveira de Andrade. - 2025.
51 f. : il.

Orientador: Lino Martins de Holanda Junior.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e Tecnologia, 2025.

1. Termoeletricidade. 2. Efeito Seebeck. 3. Efeito Peltier. 4. Sustentabilidade energética.
I. Holanda Junior, Lino Martins de, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JOÃO LUCAS OLIVEIRA DE ANDRADE

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS EFEITOS SEEBECK E PELTIER: POTENCIAL
TERMOELÉTRICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA E REFRIGERAÇÃO**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 04/ 08/ 2025.

BANCA EXAMINADORA

Lino Martins de Holanda Junior, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Hidalyn Theodory Clemente Mattos de Souza, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Wilza da Silva Lopes, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido saúde, força e sabedoria ao longo desta jornada.

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais, Francisco Rarismar de Andrade e Josefa Genely Oliveira, meu irmão, Pedro Eduardo Oliveira de Andrade, e a minha namorada, Ana Beatriz de Oliveira Sá, por todo apoio incondicional, paciência e incentivo em todos os momentos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Lino Martins de Holanda Junior, pela paciência, dedicação e orientações fundamentais para a construção deste trabalho. Sua contribuição foi essencial para o desenvolvimento do meu conhecimento acadêmico e profissional.

Agradeço aos meus amigos, Alex Bruno Duarte, Arquimedes Rodrigues Moura, Carlos Henrique de Queiroz, Gabrielle Soares de Lima, Guilherme De Franca Vasconcelos, Gustavo Fernandes Gomes do Nascimento, Harley Lucas De Souza Batista, José Veríssimo de Oliveira Queiroz, Thallys Araújo de Moraes, Rivanildo Pires Duarte Filho e Brunno Herbert Bastos Queiroga, agradeço a amizade, companheirismo e por estarem ao meu lado nos momentos bons e nos desafios. A convivência com vocês tornou essa caminhada mais leve e especial.

Agradeço à banca examinadora, pelo interesse e disponibilidade.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho.

“Você nunca vai acertar se não arriscar. Às vezes, as coisas têm que dar errado antes de dar certo. Mas eventualmente, tudo se encaixa. E, quando isso acontece, você percebe que cada escolha, cada erro, cada passo em falso. . . tudo te levou a algo melhor.”

Ted Mosby (How I Met Your Mother).

RESUMO

O crescente consumo global de energia tem impulsionado a busca por fontes alternativas que sejam renováveis, limpas e ambientalmente responsáveis. Nesse contexto, os módulos termoelétricos se destacam como dispositivos baseados no efeito Seebeck, capazes de converter gradientes de temperatura diretamente em energia elétrica. Entre suas principais vantagens estão a ausência de partes móveis, eliminando atritos e ruídos, além de não gerarem resíduos poluentes, apresentando grande potencial para aplicações em sistemas de baixo consumo. Este trabalho realiza uma análise experimental do potencial de geração energética por meio do efeito Seebeck, investigando como a variação de temperatura influencia a eficiência do processo. Em contrapartida, também é analisado o efeito Peltier, que converte energia elétrica em diferença de temperatura, sendo empregado na construção de um protótipo funcional de adegas termoelétricas. Por fim, discutem-se os fundamentos físicos desses efeitos, suas aplicações práticas, limitações tecnológicas e as principais barreiras que restringem sua ampla utilização, buscando identificar caminhos para otimizar e ampliar o uso de tecnologias termoelétricas como fontes alternativas de energia.

Palavras-Chave: termoeletricidade; efeito seebeck; efeito peltier; sustentabilidade energética.

ABSTRACT

The increasing global energy consumption has driven the search for alternative energy sources that are renewable, clean, and environmentally responsible. In this context, thermoelectric modules stand out as devices based on the Seebeck effect, capable of directly converting temperature gradients into electrical energy. Their main advantages include the absence of moving parts, eliminating friction and noise, and they do not produce polluting residues, making them highly promising for low-power applications. This work presents an experimental analysis of the energy generation potential through the Seebeck effect, investigating how temperature variation influences conversion efficiency. Conversely, the Peltier effect is also analyzed, which converts electrical energy into a temperature difference, employed here in the construction of a functional thermoelectric wine cellar prototype. Finally, the study discusses the physical principles behind the Seebeck and Peltier effects, their practical applications, technological limitations, and the main barriers to their widespread use, aiming to identify opportunities to optimize and expand thermoelectric technologies as alternative energy sources.

Keywords: thermoelectricity; seebeck effect; peltier effect; energy sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustrações dos efeitos termoelétricos	14
Figura 2 - Esquema utilizado por Thomas Johann Seebeck para demonstrar o efeito Seebeck.....	20
Figura 3 - Esquema ilustrativo referente ao efeito Seebeck	22
Figura 4 - Esquema ilustrativo referente ao efeito Peltier	23
Figura 5 - Valores do fator de mérito termoelétrico (ZT) em função da temperatura para diferentes classes de materiais.	26
Figura 6 - Pastilha termoelétrica TEC1-12706.....	27
Figura 7 - Esquema externo e interno de uma pastilha Peltier	27
Figura 8 - Associação Única de fios para obtenção do efeito termoelétrico	30
Figura 9 - Associação múltipla de fios	32
Figura 10 - Características geométricas das pastilhas Peltier evidenciando o padrão AWG e o tipo de isolamento (PVC) dos fios.....	33
Figura 11 - Esquema experimental de um microgerador termoelétrico	36
Figura 12 - Esquema experimental de uma mini geladeira	37
Figura 13 - Diferença de potencial produzida por fios de cobre e ferro ligados em conexões simples, demonstrando o poder termoelétrico dessas junções	41
Figura 14 - Diferença de potencial produzida por uma única placa Peltier utilizando baixos valores de diferença de temperatura	42
Figura 15 - Dados referentes a diferentes medidas de acordo com a direção da ventilação dos coolers em relação aos trocadores de calor	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWG	<i>American Wire Gauge</i>
COP	<i>Coeficiente de Desempenho</i>
DC	<i>Corrente Continua</i>
Ddp	<i>Diferença de Potencial</i>
FEM	<i>Força Eletromotriz</i>
NBR	<i>Norma Brasileira</i>
PVC	<i>Policloreto de Vinila</i>
TEG	<i>Gerador Termoelétrico</i>
TIMs	<i>Materiais de interface térmica</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	Coeficiente de desempenho (COP)
q_1	Quantidade de calor extraída da fonte fria
w	Energia elétrica consumida pelo dispositivo
α_p	Coeficiente de Seebeck do semicondutor tipo- p
α_n	Coeficiente de Seebeck do semicondutor tipo- n
I	Corrente elétrica aplicada
T_Q	Temperatura do lado quente
T_F	Temperatura do lado frio
K_p	Condutividade térmica do semicondutor tipo- p
K_n	Condutividade térmica do semicondutor tipo- n
R_p	Resistência elétrica do semicondutor tipo- p
R_n	Resistência elétrica do semicondutor tipo- n
ZT	Fator de mérito adimensional dos materiais termoelétricos
S	Coeficiente de Seebeck
Π	Coeficiente de Peltier
Q	Calor transferido por unidade de tempo
V	Tensão termoelétrica gerada
T	Temperatura absoluta
q	Densidade de calor
τ	Coeficiente de Thomson
J	Densidade de corrente elétrica
$T \nabla$	Gradiente de temperatura
$S^2\sigma$	Fator de potência termoelétrico (Seebeck ao quadrado vezes condutividade elétrica)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo geral.....	18
2.2	Objetivos específicos.....	18
3	REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1	Contexto histórico dos efeitos termoeletricos	19
3.2	Fundamentos dos efeitos termoelétricos.....	21
3.3	Materiais termoelétricos	24
3.4	Pastilha termoelétrica de Peltier.....	26
4	METODOLOGIA	30
4.1	Análise e observação do efeito Seebeck	30
4.2	Modelagem para análise do efeito Seebeck	34
4.3	Modelagem para análise do efeito Peltier.....	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1	Análise experimental dos efeitos Seebeck e Peltier.....	40
5.2	Análise do efeito Seebeck com fios metálicos	40
5.3	Análise do efeito Seebeck em módulos termoelétricos comerciais	42
5.4	Análise do efeito Peltier em aplicações de refrigeração.....	44
6	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

A energia é um pilar fundamental para o desenvolvimento das sociedades modernas, impulsionando a indústria, os sistemas de transporte e a vida cotidiana. A sociedade contemporânea tem na energia elétrica uma necessidade básica, constituindo-se esta em um insumo essencial para o progresso de qualquer comunidade. Desde os primórdios de sua utilização em larga escala, a eletricidade tem sido empregada de forma crescente e significativa. Atualmente, atende desde as demandas mais simples de uma residência até os complexos sistemas de grandes estabelecimentos comerciais, industriais e urbanos (Ribeiro; Braga; Rezende, 2022).

No entanto, a predominância da combustão de combustíveis fósseis como principal fonte de energia tem causado sérios impactos ambientais, como o aumento das emissões de gases de efeito estufa e o agravamento das mudanças climáticas. O uso intensivo de fontes como carvão, petróleo e seus derivados, impulsionado pela crescente demanda global por energia, transformou esses recursos nos principais responsáveis pela alteração do equilíbrio climático do planeta (Cetesb, 2011). Diante desse cenário, torna-se imperativo repensar a matriz energética global, uma vez que a sustentabilidade do modelo atual é amplamente questionável. A dependência de fontes poluentes compromete não apenas o meio ambiente, mas também a qualidade de vida das populações e a estabilidade dos ecossistemas.

Para garantir um futuro em que o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental coexistam de forma equilibrada, torna-se estratégica a busca por fontes de energia renováveis, limpas e oriundas de calor residual. Nesse contexto, a termoeletricidade se destaca como uma alternativa promissora. Avanços recentes na ciência dos materiais têm possibilitado a criação de compostos termoelétricos mais eficientes, estáveis e versáteis, com destaque para o uso de semicondutores complexos, ligas metálicas otimizadas e materiais bidimensionais, como os MXenes. Essas inovações ampliam o potencial de conversão direta de calor em eletricidade, especialmente em aplicações de pequena escala, sensoriamento e reaproveitamento de energia térmica desperdiçada (Bandaru; Jastrzębska; Birowska, 2023).

Esse cenário amplia as possibilidades de geração e aproveitamento energético a partir de diversas fontes térmicas, reforçando o papel estratégico da termoeletricidade na transição para uma matriz energética mais sustentável.

A termoeletricidade, ou termoeletricidade direta, refere-se à conversão direta de energia térmica em energia elétrica, sem a necessidade de partes móveis ou ciclos termodinâmicos convencionais. Essa energia térmica pode ter origem em diversas fontes, como

a queima de combustíveis fósseis, a biomassa ou mesmo processos nucleares, sendo comumente aproveitada em usinas termoelétricas por meio da produção de vapor para movimentação de turbinas. No entanto, outro método inovador de aproveitamento da energia térmica é representado pelos geradores termoelétricos, que exploram a diferença de temperatura entre dois meios ou superfícies para realizar essa conversão diretamente, por meio do chamado efeito Seebeck (Goldemberg, 2012).

Esses dispositivos apresentam características marcantes, como operação silenciosa, ausência de partes móveis e alta confiabilidade em ambientes de difícil acesso. Devido à sua estrutura compacta e baixa necessidade de manutenção, os geradores termoelétricos têm sido amplamente empregados em aplicações específicas, como a alimentação de sondas espaciais, sensores autônomos, sistemas de monitoramento remoto e o reaproveitamento de calor residual em processos industriais (Rowe, 2006). Apesar dessas vantagens, sua eficiência ainda limitada em comparação a outras tecnologias de conversão energética representa um desafio técnico relevante, estando diretamente relacionada às propriedades físicas dos materiais utilizados como condutividade térmica e elétrica e à dificuldade de manter gradientes térmicos estáveis ao longo do tempo (Goldsmid, 2010).

A termoeletricidade baseia-se em dois fenômenos físicos fundamentais: os efeitos Seebeck e Peltier, que evidenciam a relação direta entre energia térmica e energia elétrica em materiais condutores e semicondutores. Esses efeitos encontram ampla aplicação tecnológica, sendo utilizados em sensores, geradores e dispositivos de refrigeração compactos, com destaque para sua capacidade de operar em escala reduzida e com elevado grau de confiabilidade. No entanto, persiste a seguinte problemática: até que ponto esses dispositivos termoelétricos podem ser realmente eficazes e viáveis em aplicações práticas de geração de energia ou resfriamento, frente às limitações impostas pela eficiência dos materiais atualmente disponíveis?

Investigar os efeitos termoelétricos e compreender o desempenho prático de dispositivos baseados nos fenômenos de Seebeck e Peltier é fundamental não apenas para o avanço do conhecimento científico, mas também para a formulação de soluções energéticas mais limpas, silenciosas e adaptáveis a múltiplos cenários. Parte-se da hipótese de que os dispositivos termoelétricos, quando corretamente dimensionados e aplicados com materiais otimizados, podem representar uma alternativa viável e estratégica para geração de energia e controle térmico em pequena escala, especialmente em contextos nos quais outras tecnologias apresentam limitações técnicas ou ambientais.

Dessa forma, considera-se que o estudo aprofundado dos efeitos Seebeck e Peltier, bem como a avaliação experimental de protótipos termoelétricos, pode não apenas contribuir

para o aprimoramento de tecnologias sustentáveis, mas também indicar caminhos concretos para sua implementação em escala laboratorial e industrial. Com base nessa perspectiva, o presente trabalho propõe-se a investigar, sob uma abordagem teórico-experimental, os princípios, o desempenho e as limitações dos efeitos termoelétricos em materiais condutores e semicondutores. Por meio da análise de módulos e protótipos termoelétricos, busca-se compreender o funcionamento e o potencial desses dispositivos, estabelecendo os fundamentos necessários para sua aplicação em soluções energéticas inovadoras e sustentáveis.

A descoberta dos efeitos Seebeck e Peltier representou um marco na física do século XIX, estabelecendo as bases para a termoeletricidade moderna. Em 1821, Thomas Johann Seebeck observou que um circuito fechado composto por dois metais diferentes submetido a um gradiente de temperatura gerava uma corrente elétrica, fenômeno que posteriormente recebeu seu nome. Já em 1834, Jean Charles Athanase Peltier constatou que, ao aplicar uma corrente elétrica entre dois metais distintos, ocorria a absorção ou liberação de calor na junção, dando origem ao chamado efeito Peltier. Tais descobertas foram fundamentais para a compreensão e manipulação dos fluxos térmicos e elétricos, possibilitando o desenvolvimento de tecnologias de conversão energética e controle térmico sem partes móveis, combustão ou fluidos refrigerantes. Com o passar do tempo, esses efeitos tornaram-se a base para o desenvolvimento de dispositivos termoelétricos com aplicação em diversas áreas tecnológicas da microeletrônica à exploração espacial passando pela refrigeração portátil e pela recuperação de calor industrial. Em um cenário de crescente demanda por soluções sustentáveis, os efeitos Seebeck e Peltier continuam a impulsionar inovações tecnológicas com foco na eficiência energética e na redução de impactos ambientais (Goldsmid, 2010; Rowe, 2006).

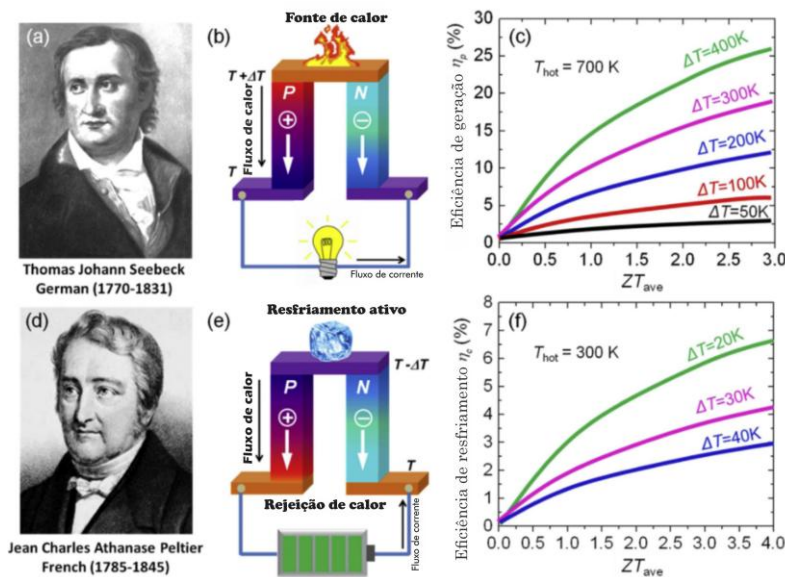
Desde suas descobertas, avanços significativos têm sido realizados na compreensão e aplicação desses fenômenos termoelétricos. Inicialmente, materiais como antimônio, bismuto e chumbo foram utilizados em geradores termoelétricos, embora apresentassem limitações em termos de eficiência. No início do século XX, o físico alemão Edmund Altenkirch formulou relações matemáticas fundamentais entre as propriedades físicas dos materiais termoelétricos e o desempenho dos dispositivos, introduzindo o conceito da figura de mérito (ZT), que se tornou um parâmetro essencial para o desenvolvimento de materiais cada vez mais eficientes (Polozine; Sirotinskaya; Schaeffer, 2014).

Além da compreensão dos efeitos termoelétricos, é fundamental considerar os parâmetros físicos que determinam a eficiência dos materiais e dispositivos termoelétricos. O principal indicador de desempenho é o fator de mérito adimensional ZT , definido por:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{k}$$

Onde S é o coeficiente de Seebeck, σ é a condutividade elétrica, T é a temperatura absoluta, e k é a condutividade térmica total do material. Um valor elevado de ZT indica uma maior capacidade de conversão de calor em eletricidade, ou vice-versa. Além de ZT , outros parâmetros mensuráveis importantes incluem a diferença de temperatura (ΔT) entre as junções, a tensão elétrica gerada, a corrente elétrica e a resistência interna do módulo. Esses valores são fundamentais tanto para caracterizar materiais quanto para projetar dispositivos termoeletrônicos otimizados. Como destacado por Bell (2008), avanços na engenharia de materiais que permitam aumentar ZT têm o potencial de tornar sistemas termoeletrônicos mais competitivos frente às tecnologias convencionais de geração e gerenciamento térmico.

Figura 1 - Ilustrações dos efeitos termoeletrônicos



Fonte: Zhao *et al.* (2014a).

Notas: (a) Thomas J. Seebeck; (b) efeito Seebeck gerando eletricidade a partir de um gradiente de temperatura; (c) eficiência de geração de energia em função de ZT_{ave} ; (d) Jean C. A. Peltier; (e) efeito Peltier promovendo refrigeração ao aplicar corrente elétrica; (f) eficiência de refrigeração em função de ZT_{ave} .

Na Figura 1 são apresentadas ilustrações esquemáticas que evidenciam o funcionamento dos módulos termoeletrônicos tanto para geração de energia, por meio do efeito Seebeck, quanto para aplicações de refrigeração ativa, baseadas no efeito Peltier. A figura contempla, inicialmente, a imagem do físico alemão Thomas Johann Seebeck, responsável pela descoberta do efeito termoeletrônico que leva seu nome. Em seguida, observa-se o esquema representativo do efeito Seebeck, no qual a aplicação de uma diferença de temperatura entre as

extremidades de um material termoelétrico faz com que os portadores de carga, sejam eles elétrons ou lacunas, se difundam do lado quente para o lado frio, gerando assim um fluxo de corrente elétrica ao longo do circuito externo.

A termoeletricidade tem ganhado crescente atenção não apenas por seu princípio físico fascinante, mas também pelas aplicações práticas que oferece em diversos setores. Para além da abordagem fenomenológica dos efeitos Seebeck e Peltier, é essencial considerar os mecanismos atômicos que os fundamentam. Recentemente, pesquisadores da Universidade Técnica de Viena desenvolveram um novo material composto por ferro, vanádio, tungstênio e alumínio, que alcançou um valor de figura de mérito (ZT) entre 5 e 6, superando expressivamente os valores anteriores, que variavam entre 2,5 e 2,8. Esse avanço possibilita a geração de energia elétrica a partir de diferenças de temperatura, apresentando aplicações potenciais em sensores e pequenos processadores (Cimm, 2022).

No Brasil, iniciativas como a da Universidade Federal do Rio Grande do Sul resultaram no desenvolvimento de bancadas didáticas de baixo custo para estudo dos efeitos termoelétricos, facilitando a compreensão e aplicação desses fenômenos em ambientes educacionais (Izidoro, 2015). Além disso, foi desenvolvido um protótipo de microgerador termoelétrico para captação de energias residuais em processos industriais, demonstrando a viabilidade da aplicação prática do efeito Seebeck em contextos reais (Junior, 2014).

Esses avanços não apenas demonstram a maturidade tecnológica dos dispositivos termoelétricos, como também evidenciam seu potencial estratégico no contexto das energias renováveis. Sua capacidade de gerar eletricidade a partir de calor residual tem impulsionado aplicações em setores como a energia solar onde podem ser acoplados a coletores térmicos para maximizar a conversão energética e na geotermia, aproveitando o calor natural da Terra de forma contínua e silenciosa (Riffat; Ma, 2014; Beretta *et al.*, 2019).

O aprimoramento de materiais com maior fator de mérito termoelétrico, incluindo ligas semicondutoras de alto desempenho, tem elevado a eficiência desses sistemas, tornando-os mais competitivos frente às tecnologias tradicionais (Polozine; Sirotinskaya; Schaeffer, 2014). No Brasil, estudos aplicados reforçam essa tendência, como o desenvolvimento de microgeradores termoelétricos capazes de recuperar energia de processos industriais, contribuindo diretamente para a sustentabilidade energética e a redução do desperdício térmico (JUNIOR, 2014). Assim, a integração da termoeletricidade às estratégias de transição energética representa um caminho promissor rumo a sistemas energéticos mais limpos, eficientes e resilientes.

Entre as aplicações mais conhecidas dos efeitos termoelétricos está o uso das placas Peltier, também chamadas de módulos termoelétricos. Esses dispositivos semicondutores destacam-se por sua capacidade de realizar trocas térmicas com alta precisão e sem partes móveis, o que os torna ideais para aplicações em espaços reduzidos ou sensíveis a vibrações. Compostos por pares de materiais tipo “n” e tipo “p”, comumente telureto de bismuto dopado organizados em série elétrica e paralelo térmico, são intercalados entre duas camadas cerâmicas que proporcionam isolamento elétrico e dissipação térmica eficiente. Quando uma corrente elétrica contínua é aplicada, os portadores de carga transportam calor de uma face à outra do módulo: uma superfície se resfria enquanto a outra aquece, de acordo com o efeito Peltier.

Essa capacidade de controle térmico direto tem viabilizado o uso das placas Peltier em sistemas de refrigeração compactos e silenciosos, como em equipamentos médicos, dispositivos portáteis, sistemas eletrônicos de precisão e até mesmo em aplicações espaciais. No entanto, apesar de suas vantagens em termos de simplicidade e ausência de partes móveis, sua eficiência ainda é limitada quando comparada a sistemas tradicionais baseados em compressão mecânica, apresentando coeficiente de desempenho relativamente baixo. Por esse motivo, a busca por materiais com maior fator de mérito termoelétrico (ZT) continua sendo uma prioridade na área, com o objetivo de tornar esses dispositivos mais competitivos e viáveis em larga escala. Assim, o desenvolvimento e a otimização das placas Peltier se inserem no esforço mais amplo por soluções termoelétricas inovadoras, sustentáveis e integradas à matriz energética do futuro (Rowe, 2006).

Diante da crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis, silenciosas e de alta eficiência, a termoeletricidade surge como uma alternativa viável e estratégica, especialmente em contextos em que o aproveitamento de calor residual pode ser convertido em benefício energético. Essa tecnologia está alinhada aos compromissos internacionais para redução das emissões de gases de efeito estufa, conforme os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em particular o ODS 7, que visa garantir o acesso confiável, sustentável e moderno à energia para todos, e o ODS 13, voltado à ação contra a mudança global do clima. No cenário brasileiro, caracterizado por desafios na distribuição energética e abundância de fontes térmicas desperdiçadas em setores como o industrial e o agroindustrial, a aplicação de dispositivos termoelétricos apresenta-se como uma oportunidade significativa para diversificar e descentralizar a matriz energética nacional.

Embora os avanços nos materiais e no desenvolvimento de dispositivos termoelétricos sejam promissores, a escalabilidade e a eficiência ainda representam desafios técnicos relevantes, exigindo estudos aprofundados para viabilizar sua ampla adoção comercial.

Ademais, as aplicações emergentes em dispositivos vestíveis, Internet das Coisas (IoT) e sistemas embarcados demonstram o potencial crescente dessa tecnologia para atender às demandas de múltiplos setores.

Assim, a compreensão detalhada dos efeitos Seebeck e Peltier, bem como a avaliação teórico-experimental do desempenho de módulos e protótipos termoelétricos, é fundamental para avançar no desenvolvimento de soluções energéticas limpas, silenciosas e adaptáveis. Partindo dessa premissa, o presente trabalho propõe-se a investigar os princípios, o desempenho e as limitações dos efeitos termoelétricos em materiais condutores e semicondutores. Por meio da análise de dispositivos termoelétricos, busca-se compreender seu funcionamento e potencial, estabelecendo os fundamentos necessários para sua aplicação em soluções energéticas inovadoras e sustentáveis.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar, sob uma abordagem teórico experimental, os efeitos termoelétricos de Seebeck e Peltier em materiais condutores e semicondutores, com o intuito de compreender seus mecanismos de funcionamento, avaliar seu desempenho e identificar suas potencialidades e limitações para aplicações práticas em sistemas sustentáveis de geração de energia elétrica e refrigeração de pequena escala, isentos de partes móveis e fluidos refrigerantes, promovendo, assim, soluções tecnológicas de baixo impacto ambiental e alta eficiência energética.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a caracterização experimental dos efeitos Seebeck e Peltier em fios condutores e módulos termoelétricos, por meio da medição de grandezas elétricas e térmicas relevantes, a fim de validar os princípios físicos envolvidos e quantificar seu comportamento em diferentes condições operacionais;
- Projetar, montar e testar protótipos baseados em módulos Peltier, visando avaliar sua eficiência tanto na conversão de gradientes térmicos em energia elétrica quanto no resfriamento de ambientes controlados, com foco em aplicações compactas e autônomas;
- Analisar criticamente os fatores que limitam o desempenho dos dispositivos termoelétricos, considerando aspectos como a manutenção dos gradientes térmicos, a condutividade dos materiais e a dissipação de calor, com vistas à proposição de estratégias que possam otimizar sua aplicação em contextos reais.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 CONTEXTO HISTÓRICO DOS EFEITOS TERMOELETRICOS

O efeito Seebeck foi descoberto por Thomas Johann Seebeck em 1821, quando, ao unir dois condutores diferentes em suas extremidades e submetê-los a uma diferença de temperatura, observou que uma agulha magnética próxima se deslocava. Seebeck publicou seus resultados afirmando que condutores ou semicondutores diferentes unidos em suas extremidades e submetidos a uma diferença de temperatura entre eles produzem tensão (Cavalcanti, 1997).

Apesar de sua relutância inicial, Seebeck conduziu experimentos cruciais que pavimentaram o caminho para o entendimento moderno da termoeletricidade. Ao experimentar com diversos metais como antimônio, bismuto, cobre e platina e observar o desvio da agulha magnética em função da diferença de temperatura nas junções, estabeleceu uma série termoelétrica com base no potencial termoelétrico gerado por diferentes pares de metais. Constatou-se que, quanto maior o contraste entre os metais utilizados, maior a força eletromotriz resultante, sendo a combinação antimônio-bismuto a mais eficaz.

Posteriormente, com os trabalhos de Wilhelm Gottlieb Hankel, desenvolvidos a partir de sua tese doutoral na Universidade de Halle em 1839 e publicados em 1840 e 1842, essas “tensões termotérmicas” foram formalmente reconhecidas como forças eletromotrizes termoelétricas. Embora sua descoberta tenha sido obscurecida por quase um século, retomou relevância com os estudos sobre semicondutores liderados por William Shockley e colaboradores. O legado de Seebeck permanece crucial para a física moderna, sendo ele reconhecido como um pioneiro na compreensão dos fenômenos termoelétricos. Em reconhecimento, tornou-se membro da Academia de Ciências de Berlim e da Academia Francesa de Ciências em 1825, falecendo em 10 de dezembro de 1831 (Silva; Luiz, 2005).

Figura 2 - Esquema utilizado por Thomas Johann Seebeck para demonstrar o efeito Seebeck



Fonte: Zhao *et al.* (2014a).

O efeito Seebeck consiste, portanto, na geração de uma diferença de potencial elétrico entre duas junções compostas por materiais semicondutores distintos, quando submetidas a temperaturas diferentes. Esse fenômeno ocorre quando um circuito formado por dois metais de propriedades distintas (A e B) é exposto a gradientes térmicos, resultando na formação de uma tensão nos terminais do circuito (Botan, 2014). Para a detecção dessa tensão, é necessário conectar as extremidades dos fios a um galvanômetro ou a um voltímetro de alta sensibilidade. Ao se aquecer a junção entre os fios, o instrumento registra uma pequena diferença de potencial (Goldsmid, 2010).

Além do efeito Seebeck, outro fenômeno termoelétrico importante, seu inverso, foi descoberto em 1834, quando o físico francês Jean Charles Athanase Peltier observou que uma junção metálica formada por bismuto (Bi) e cobre (Cu) se aquecia ao ser percorrida por uma corrente elétrica no sentido do bismuto para o cobre, e se resfriava quando esse sentido era invertido. Esse comportamento evidenciou um fenômeno eletrotérmico distinto, posteriormente denominado efeito Peltier, caracterizado pela absorção ou liberação de calor em junções de dois materiais diferentes, em função da direção da corrente elétrica. A descoberta de Peltier foi impulsionada pelos estudos anteriores do físico italiano Leopoldo Nobili, que, entre 1827 e 1835, investigou experimentalmente a interação entre gradientes de temperatura e corrente elétrica, classificando os efeitos observados como “corrente termoelétrica” e “corrente hidroelétrica”. Motivado por esses achados, Peltier desenvolveu um galvanômetro de alta sensibilidade para medir pequenas correntes em metais como antimônio (Sb) e bismuto (Bi), além de um termoscópio termoelétrico com o qual avaliou a

distribuição de temperatura em termopares. Substituindo mais tarde o termoscópio por um termômetro de ar, ele identificou variações térmicas precisas nas junções metálicas, levando à constatação do fenômeno termoelétrico que hoje leva seu nome. Embora suas observações iniciais apontassem para o aquecimento dos condutores como um todo, Peltier concentrou-se na elevação da temperatura e não na quantidade de calor envolvida, permanecendo, assim, dentro dos limites experimentais da época. Sua contribuição, no entanto, foi fundamental para o desenvolvimento da ciência termoelétrica e da conversão direta entre energia térmica e elétrica (Bassalo, 2019).

3.2 FUNDAMENTOS DOS EFEITOS TERMOELÉTRICOS

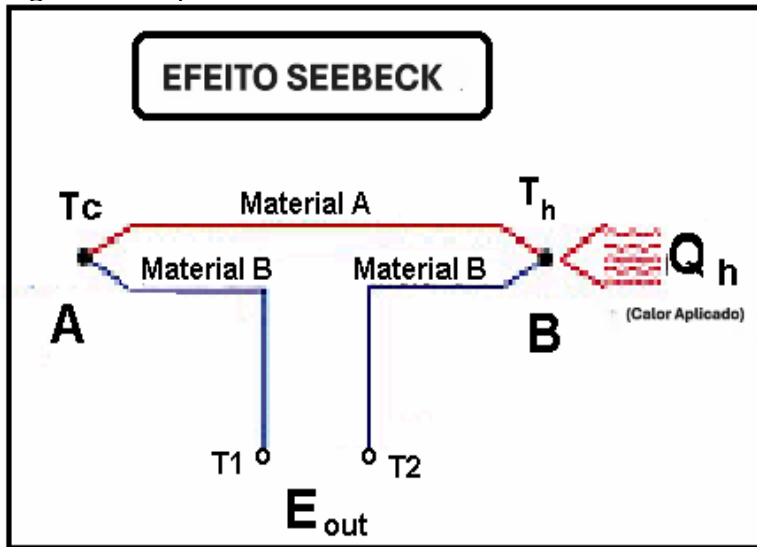
Os efeitos termoelétricos descrevem fenômenos que ocorrem em materiais condutores e semicondutores quando há uma interação entre gradientes de temperatura e o transporte de cargas elétricas. Esses efeitos são essenciais tanto para a geração quanto para o controle de calor via corrente elétrica, sendo classificados em três categorias principais: *efeito Seebeck*, *efeito Peltier* e *efeito Thomson* (Goldsmid, 2010; Rowe, 2006).

O *efeito Seebeck*, descoberto por Thomas Johann Seebeck em 1821, ocorre quando dois materiais diferentes são conectados em um circuito fechado, com suas junções expostas a diferentes temperaturas. Isso induz uma força eletromotriz (fem) devido à difusão não uniforme dos portadores de carga provocada pelo gradiente térmico. A tensão gerada é proporcional à diferença de temperatura e depende das propriedades eletrônicas dos materiais:

$$V = \int_{T_1}^{T_2} S(T) dT$$

em que V é a tensão termoelétrica, $S(T)$ é o coeficiente de Seebeck e T_1 e T_2 são as temperaturas nas duas junções. Materiais com alto coeficiente de Seebeck, como o telureto de bismuto (Bi_2Te_3), são amplamente utilizados em geradores termoelétricos. A magnitude e o sinal do coeficiente indicam, respectivamente, a eficiência potencial e o tipo de portador majoritário (elétron ou lacuna) (Goldsmid, 2010; Snyder; Toberer, 2008). A figura 3 representa o determinado efeito:

Figura 3 - Esquema ilustrativo referente ao efeito Seebeck



Fonte: Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/The-Seebeck-effect_fig1_292976771 (2016).

Em nível atômico, o efeito Seebeck pode ser compreendido como uma consequência da difusão desigual dos portadores de carga (elétrons ou lacunas) em resposta a um gradiente de temperatura. Quando um lado de um material condutor ou semicondutor é aquecido, os portadores de carga nessa região adquirem maior energia cinética e tendem a se mover em direção à região mais fria, onde sua energia térmica é menor. Esse fluxo resulta em uma redistribuição de carga, criando uma diferença de potencial elétrico ao longo do material.

Nos semicondutores, essa dinâmica é ainda mais influenciada pela estrutura de bandas eletrônicas. Em materiais tipo-n, os elétrons na banda de condução dominam o transporte, enquanto em materiais tipo-p são as lacunas na banda de valência que se movimentam. A diferença nas densidades de estados disponíveis e nas energias dos portadores nos dois extremos do material define o valor do coeficiente de Seebeck. Portanto, do ponto de vista microscópico, o efeito Seebeck emerge do movimento estatístico de portadores em um meio não uniforme termicamente, governado pelas distribuições de Fermi-Dirac e pela interação com as imperfeições cristalinas e fônons (Snyder; Toberer, 2008).

O *efeito Peltier*, observado por Jean Charles Peltier em 1834, é o inverso do efeito Seebeck. Ele ocorre quando uma corrente elétrica atravessa uma junção entre dois materiais diferentes, resultando em absorção ou liberação de calor nessa interface. Essa transferência de calor é distinta do aquecimento resistivo (efeito Joule) e pode ser aproveitada para aplicações em refrigeração de estado sólido. A taxa de calor transferido é expressa por:

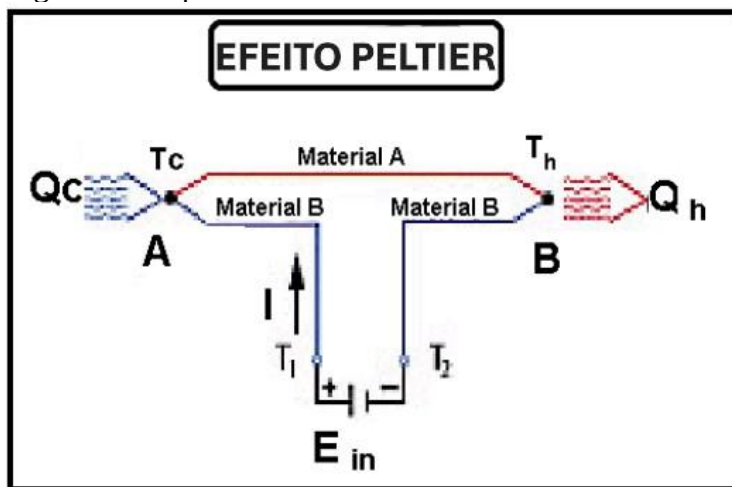
$$Q = \Pi \cdot I$$

onde Q é o calor transferido por unidade de tempo, Π é o coeficiente de Peltier e I é a corrente elétrica aplicada. O coeficiente de Peltier está relacionado ao coeficiente de Seebeck pela relação de Kelvin:

$$\Pi = S \cdot T$$

o que revela a conexão termodinâmica entre os fenômenos (Rowe, 2006; Goldsmid, 2010).

Figura 4 - Esquema ilustrativo referente ao efeito Peltier



Fonte: Fonte: Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/The-Seebeck-effect_fig1_292976771 (2016).

Do ponto de vista atômico, o efeito Peltier está relacionado à mudança de energia interna dos portadores de carga quando eles atravessam a interface entre dois materiais diferentes. Cada material possui uma estrutura eletrônica distinta, com diferentes níveis de energia para os estados permitidos dos elétrons. Quando um elétron passa de um material A para um material B, ele pode ganhar ou perder energia dependendo da diferença nos níveis de Fermi e na estrutura de bandas dos dois materiais.

Se um elétron entra em um material onde o nível de energia dos portadores é mais alto, ele absorve energia térmica do meio para compensar a diferença; esse processo resulta em refrigeração local. No sentido oposto, se o elétron entra em um material de energia mais baixa, ele libera essa energia excedente na forma de calor, resultando em aquecimento local. Esse fenômeno não envolve dissipação resistiva, mas sim uma transferência coerente de energia devido às diferenças eletrônicas intrínsecas entre os materiais, o que o distingue do efeito Joule (Goldsmid, 2010; Snyder; Toberer, 2008).

O *efeito Thomson*, previsto por William Thomson (posteriormente Lord Kelvin) em

1851, é o menos conhecido entre os três, mas desempenha papel importante em análises detalhadas de transferência de calor. Ele ocorre em um único condutor submetido simultaneamente a um gradiente de temperatura e a uma corrente elétrica contínua. A energia térmica gerada ou absorvida ao longo do condutor é dada por:

$$q = \tau \cdot J \cdot \nabla T$$

em que q é a densidade de calor, τ é o coeficiente de Thomson, J é a densidade de corrente e ∇T é o gradiente de temperatura. Ao contrário dos efeitos Seebeck e Peltier, o efeito Thomson depende apenas de um único material e está associado às variações na energia dos portadores ao longo do gradiente térmico (Snyder; Ursell, 2003; Rowe, 2006). Os três efeitos são interdependentes e podem ser descritos em conjunto pelas relações termodinâmicas de Kelvin. Essas equações mostram que os coeficientes termoelétricos estão ligados a propriedades fundamentais dos materiais, como estrutura de bandas eletrônicas, concentração de portadores, mobilidade e condutividade térmica. Compreender esses efeitos de forma integrada é essencial para a engenharia de dispositivos termoelétricos de alta eficiência, tanto para geração de energia (modo gerador) quanto para controle térmico (modo refrigerador) (Goldsmid, 2010; Rowe, 2006; Bell, 2008).

3.3 MATERIAIS TERMOELÉTRICOS

Os materiais termoelétricos são substâncias capazes de converter calor em eletricidade e vice-versa, desempenhando papel central na construção de dispositivos geradores e refrigeradores de estado sólido. A eficiência desses materiais depende fortemente de suas propriedades eletrônicas e térmicas, exigindo uma combinação otimizada de alto coeficiente de Seebeck, elevada condutividade elétrica e baixa condutividade térmica (Rowe, 1995; Snyder; Toberer, 2008).

Essa combinação de propriedades é desafiadora, pois, em muitos casos, elas são interdependentes: por exemplo, aumentar a condutividade elétrica frequentemente resulta em aumento da condutividade térmica, o que reduz o desempenho termoelétrico. Para expressar a eficiência global de um material, utiliza-se o parâmetro adimensional ZT , que combina essas três grandezas em função da temperatura absoluta. Assim, o desenvolvimento de materiais termoelétricos envolve estratégias para maximizar o chamado fator de potência ($S^2\sigma$) enquanto se reduz a condutividade térmica, especialmente a componente fonônica (Bell, 2008; Mahan; Sofo,

1996).

Materiais semicondutores são amplamente preferidos, pois permitem ajustes precisos das propriedades por meio de dopagem controlada. Entre os compostos mais utilizados destaca-se o telureto de bismuto (Bi_2Te_3), eficiente na faixa de temperatura próxima ao ambiente e largamente empregado tanto em geradores quanto em microgeladeiras termoelétricas. Suas ligas com antimônio (Sb_2Te_3) ou selênio (Bi_2Se_3) permitem a formação de pares tipo-n e tipo-p, viabilizando o funcionamento completo de módulos termoelétricos comerciais (Goldsmid, 2010; Rowe, 1995).

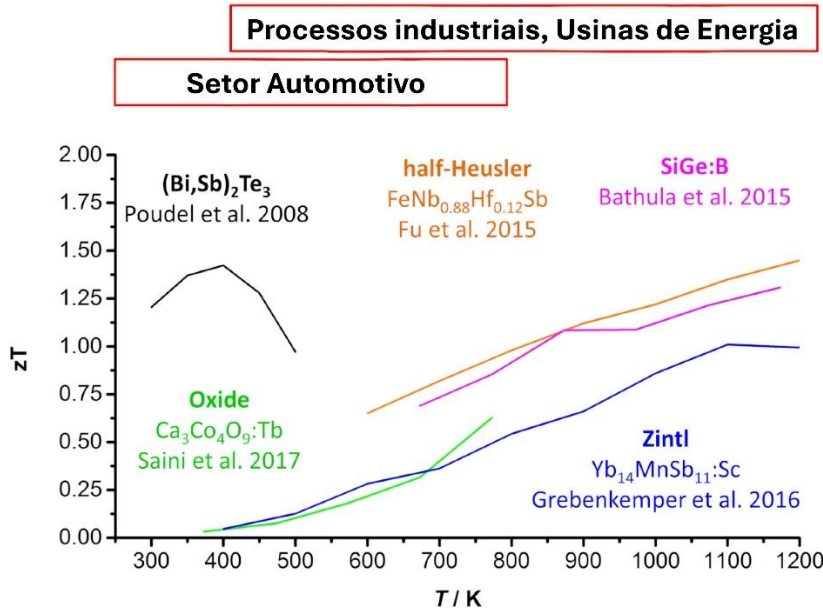
Para aplicações em temperaturas intermediárias (300–600 °C), o telureto de chumbo (PbTe) apresenta desempenho eficiente, sendo utilizado em sistemas de recuperação de calor industrial. Em faixas ainda mais elevadas, como em missões espaciais e aplicações automotivas, destacam-se as ligas de silício-germânio (SiGe), que suportam até 1000 °C com estabilidade mecânica e química (Rowe, 1995; Snyder; Toberer, 2008).

Nos últimos anos, a pesquisa em materiais termoelétricos avançou com o uso de nanoestruturas, dopagem eletrônica seletiva e design de compósitos. Materiais nanoestruturados, como super redes, introduzem interfaces que dispersam fônons sem afetar a mobilidade dos elétrons, reduzindo assim a condutividade térmica de forma seletiva. Estruturas como os compósitos de matriz polimérica condutora com nanocargas inorgânicas vêm sendo exploradas por sua flexibilidade, baixo custo e leveza, embora ainda apresentem menor eficiência comparada aos materiais inorgânicos cristalinos (He; Tritt, 2017; Zhao *et al.*, 2014b).

Outros sistemas emergentes incluem os materiais tipo Half-Heusler, que oferecem boa estabilidade térmica e potencial para aplicações em larga escala, e os compostos de SnSe , que atingiram valores de ZT superiores a 2,6 em determinadas direções cristalográficas, demonstrando o impacto da anisotropia estrutural sobre o transporte termoelétrico (Zhao *et al.*, 2014b).

O valor de ZT depende diretamente do coeficiente Seebeck, da condutividade elétrica e da condutividade térmica do material. Valores elevados de ZT indicam maior eficiência de conversão energética, sendo que materiais com ZT superior a 1 já são considerados promissores para aplicações práticas (Bell, 2008). Alguns parâmetros medidos de determinados materiais podem ser visualizados na Figura 5:

Figura 5 - Valores do fator de mérito termoelétrico (ZT) em função da temperatura para diferentes classes de materiais.



Fonte: Wolf, Hinterding e Feldhoff (2019).

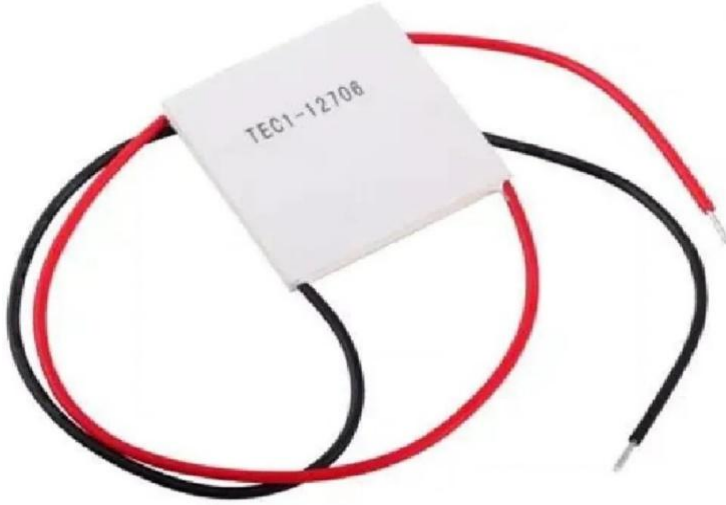
É possível observar que tais fenômenos ultrapassam os limites da teoria e têm sido explorados em soluções tecnológicas concretas. A escolha do material ideal depende da faixa de temperatura de operação, da aplicação (geração ou refrigeração), da estabilidade química e da facilidade de processamento. O contínuo avanço na engenharia de materiais termoelétricos representa um passo estratégico para o desenvolvimento de soluções sustentáveis de conversão energética, como microgeladeiras portáteis, sensores térmicos autônomos e sistemas de recuperação de calor industrial (Bell, 2008; He; Tritt, 2017).

3.4 PASTILHA TERMOELÉTRICA DE PELTIER

A pastilha de Peltier, ou módulo termoelétrico de estado sólido, é um dispositivo amplamente utilizado para aplicações de refrigeração e controle térmico de pequena escala. Baseado no efeito Peltier, seu princípio de funcionamento reside na conversão direta de energia elétrica em transferência de calor, sem a necessidade de partes móveis ou fluidos refrigerantes (Rowe, 2006).

A pastilha é formada por dezenas a centenas de pares de semicondutores tipo-*n* e tipo-*p*, dispostos em configuração alternada entre duas placas cerâmicas planas. Esses pares são conectados eletricamente em série por contatos metálicos e termicamente em paralelo. A geometria e organização dos elementos asseguram que, ao se aplicar uma corrente contínua, o calor seja absorvido por uma face (lado frio) e dissipado pela outra (lado quente) (Goldsmid, 2010).

Figura 6 - Pastilha termoeétrica TEC1-12706

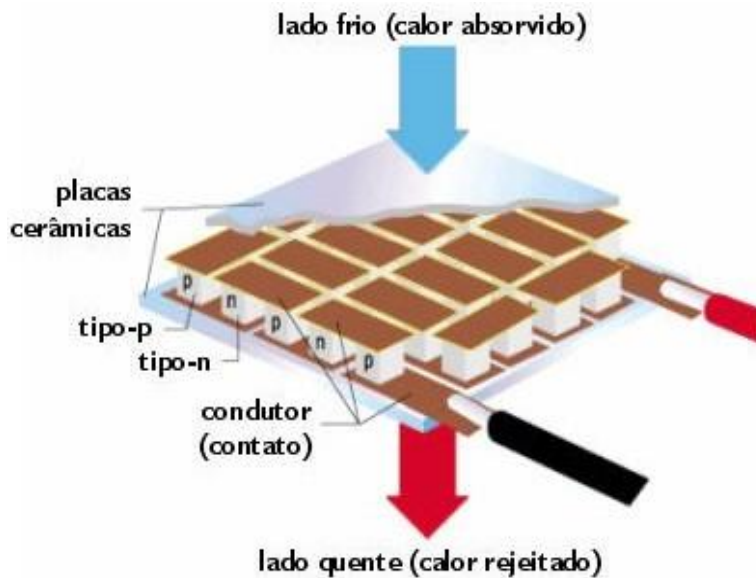


Fonte: (PASTILHA, 2025).

As placas externas geralmente são de alumina (Al_2O_3), por sua boa condutividade térmica, resistência mecânica e propriedades isolantes. As interconexões metálicas tipicamente de cobre com revestimento antioxidação conectam os elementos n e p de forma alternada, formando um circuito interno fechado. A carcaça cerâmica garante isolamento elétrico entre os termoelementos e o ambiente, ao mesmo tempo que conduz calor eficientemente. Os materiais usados para a fabricação dos elementos semicondutores são selecionados com base em seu desempenho termoeétrico, expresso pelo fator de mérito adimensional ZT .

O composto mais amplamente utilizado nas pastilhas comerciais é o telureto de bismuto (Bi_2Te_3), frequentemente dopado para formar as versões tipo-*n* (com telúrio em excesso) e tipo-*p* (com bismuto em excesso ou dopado com Sb). Esse material apresenta valores típicos de ZT entre 0,8 e 1, em temperatura ambiente, sendo adequado para aplicações entre 200 K e 400 K (Bell, 2008; Goldsmid, 2010).

Figura 7 - Esquema externo e interno de uma pastilha Peltier



Fonte: Emiliavaca *et al.* (2012).

Técnicas como nanoestruturação, inserção de defeitos controlados e engenharia de interfaces têm sido empregadas para melhorar o desempenho dos materiais, dificultando a condução térmica sem prejudicar o transporte eletrônico (Snyder; Toberer, 2008).

Quando uma corrente elétrica é aplicada à pastilha, os portadores de carga (elétrons no semicondutor tipo-*n* e lacunas no tipo-*p*) absorvem energia do lado frio e a transportam para o lado quente, onde a energia é liberada. Esse processo gera um gradiente de temperatura entre as duas faces da pastilha. A inversão da polaridade da corrente também inverte a direção do fluxo de calor, permitindo o uso tanto para aquecimento quanto para refrigeração (Rowe, 1995; Yamashita, 2012).

As pastilhas de Peltier são fabricadas em tamanhos compactos (geralmente entre 20 mm e 50 mm de lado, com espessura de poucos milímetros), o que as torna ideais para aplicações onde o espaço é limitado. São usadas em mini refrigeradores, estabilizadores térmicos, climatizadores portáteis, equipamentos médicos, ópticos e eletrônicos. Em muitos projetos, a pastilha é acoplada a um dissipador de calor e, frequentemente, a um ventilador, para remover o calor acumulado na face quente e manter o desempenho térmico eficiente.

A integração eficiente da pastilha com o sistema térmico exige atenção ao isolamento térmico da face fria e à resistência térmica da interface com os dissipadores. Materiais de interface térmica (TIMs) de alta condutividade, como pastas térmicas e folhas de grafite, são essenciais para reduzir perdas e maximizar a eficiência prática do módulo (Yamashita, 2012).

A eficiência de conversão energética, também denominada coeficiente de desempenho (COP), do inglês *coefficient of performance*, é um parâmetro fundamental para a avaliação da

qualidade de dispositivos termoeletrônicos operando como refrigeradores (Campos *et al.*, 2010). O COP é definido como a razão entre a quantidade de calor extraído da fonte fria, q_1 , e a energia elétrica consumida, w , conforme expresso em:

$$\phi = \frac{q_1}{w}$$

Quando uma corrente elétrica atravessa a junção termoeletrônica, três processos físicos ocorrem simultaneamente: o efeito Peltier, responsável pelo resfriamento; a condução de calor através dos materiais; e a geração de calor pelo efeito Joule. Assim, a taxa de calor extraído da fonte fria, q_1 , pode ser descrita por:

$$q_1 = (\alpha_p - \alpha_n)IT_Q - (T_Q - T_F)(R_p + R_n) - \frac{1}{2}(R_p + R_n)I^2$$

em que α_p e α_n são os coeficientes Seebeck dos semicondutores tipo p e n, K_p e K_n representam suas condutividades térmicas, R_p e R_n suas resistências elétricas, I é a corrente elétrica aplicada, T_Q é a temperatura do lado quente e T_F a temperatura do lado frio. Por outro lado, a energia elétrica consumida pelo dispositivo apresenta duas contribuições principais: a energia necessária para vencer a tensão termoeletrônica gerada e as perdas resistivas internas. Este consumo total pode ser matematicamente descrito como:

$$w = (\alpha_p - \alpha_n)I(T_Q - T_F) + (R_p + R_n)I^2$$

Em um cenário ideal, onde não houvesse perdas associadas à condução de calor nem ao efeito Joule, o coeficiente de desempenho ϕ alcançaria o limite superior estabelecido pelo ciclo de Carnot (Beeby; Cao; Almussallam, 2013). Na prática, entretanto, refrigeradores termoeletrônicos típicos apresentam COP em torno de 2, valor inferior aos refrigeradores baseados em compressão de vapor, cujo COP pode atingir valores entre 3 e 4. Apesar disso, não existem limitações teóricas fundamentais que impeçam o aumento expressivo da eficiência dos dispositivos termoeletrônicos (Campos *et al.*, 2010).

4 METODOLOGIA

4.1 ANÁLISE E OBSERVAÇÃO DO EFEITO SEEBECK

Neste trabalho, foram conduzidas duas etapas experimentais com o objetivo de analisar quantitativamente os fenômenos termoelétricos, com ênfase nos efeitos Seebeck e Peltier. As experiências envolveram desde montagens didáticas simplificadas até a utilização de módulos termoelétricos comerciais, visando explorar aplicações práticas tanto na geração de energia elétrica a partir de calor quanto em sistemas de refrigeração termoelétrica.

Na primeira etapa experimental, o foco esteve na observação e caracterização do efeito Seebeck. Para isso, foi montado um arranjo simples utilizando fios de cobre e ferro conectados por solda, formando uma junção bimetalúca. Essa configuração buscou simular o princípio fundamental do efeito Seebeck, no qual a aplicação de um gradiente de temperatura entre as extremidades dos metais distintos induz a geração de uma tensão elétrica mensurável.

A montagem permitiu a visualização direta da conversão de energia térmica em energia elétrica, conforme representado esquematicamente na Figura 8, que ilustra o experimento básico de demonstração do efeito Seebeck.

Figura 8 - Associação Única de fios para obtenção do efeito termoelétrico



Fonte: Arquivo pessoal (2023)

Foram utilizados fios de cobre com diâmetro de 0,730 mm e fios de ferro com diâmetro de 0,820 mm, ambos com comprimento de 43 cm. Esses fios foram preparados retirando-se a camada

isolante (quando presente) em suas extremidades, garantindo o contato elétrico direto e a formação das junções metálicas necessárias. As conexões foram realizadas utilizando ferro de solda com estanho, visando mínima resistência de contato e maior estabilidade térmica.

O experimento foi conduzido empregando duas fontes térmicas distintas. Para a fonte fria, utilizou-se um recipiente contendo água com gelo, garantindo temperatura próxima de 0°C. Para a fonte quente, outro recipiente com água foi aquecido até atingir seu ponto de ebulição (aproximadamente 100°C). Dessa forma, foi possível obter gradientes de temperatura significativos entre as extremidades dos fios.

O objetivo inicial consistiu em determinar a variação da diferença de potencial gerada em função da diferença de temperatura aplicada. Para isso, manteve-se a temperatura da fonte fria constante, enquanto a temperatura da fonte quente foi ajustada progressivamente por meio da adição controlada de pequenas quantidades de água fria com o uso de uma seringa graduada, permitindo um resfriamento gradual e controlado do sistema. Essa abordagem possibilitou manter a variação de temperatura como variável independente bem definida ao longo dos testes. Inicialmente, a água da fonte quente foi aquecida até cerca de 100 °C, enquanto a fonte fria permaneceu estabilizada a 0 °C, utilizando-se gelo como meio de resfriamento. A partir desse ponto, as medições foram realizadas à medida que a temperatura da fonte quente era reduzida gradualmente, por meio da adição da água fria, possibilitando o registro da diferença de potencial em diferentes gradientes térmicos.

As medições da diferença de potencial foram realizadas com um multímetro digital de alta precisão (modelo U1252B, fabricante Agilent), e as temperaturas foram monitoradas por meio de um termômetro digital (modelo MT-455, fabricante Minipa) em conjunto com dois termômetros analógicos de mercúrio (modelo Esc Ext -10+110:1°C, líquido vermelho, capilar amarelo, 260x6 mm, fabricante Incoterm). A combinação desses instrumentos permitiu uma leitura simultânea e contínua da temperatura nas extremidades do sistema, garantindo maior confiabilidade aos dados coletados.

O experimento foi repetido diversas vezes até que os valores medidos se mostrassem consistentes e reprodutíveis, sendo cada nova execução iniciada após o reestabelecimento das condições térmicas iniciais. A cada repetição, a variação de temperatura entre as extremidades era mantida aproximadamente constante, assegurando que as leituras da diferença de potencial estivessem associadas a uma mesma condição térmica, permitindo comparações precisas entre os dados obtidos.

Além da análise com pares simples de fios, foi realizada uma segunda etapa experimental para determinar a observação do efeito com o objetivo de investigar o

comportamento do potencial termoelétrico em função do número de junções. Para isso, adotou-se inicialmente uma condição térmica fixa: a temperatura do recipiente quente foi mantida em aproximadamente 98 °C, enquanto o recipiente frio foi estabilizado a 0 °C com o uso de gelo. Nessa configuração, foram realizadas medições sucessivas da diferença de potencial gerada, variando-se sistematicamente a quantidade de junções termoelétricas conectadas em série.

O arranjo experimental foi composto por doze fios de cobre e seis fios de ferro, intercalados alternadamente e unidos por solda, formando até seis junções bimetálicas e pode ser visualizado na Figura 9. A coleta de dados foi iniciada com uma única junção e, a cada repetição, uma nova ligação era adicionada à série, até completar as seis junções. Esse procedimento permitiu verificar experimentalmente o efeito acumulativo da tensão gerada, confirmando a proporcionalidade entre o número de junções e o valor da diferença de potencial, conforme previsto pela teoria do efeito Seebeck.

Figura 9 - Associação múltipla de fios



Fonte: Arquivo pessoal (2023)

Apesar da coerência com a teoria, identificou-se como limitação a baixa tensão gerada pelos arranjos de fios metálicos, o que dificultou a realização de medições com alta precisão e inviabilizou aplicações práticas de geração de energia com esse arranjo didático.

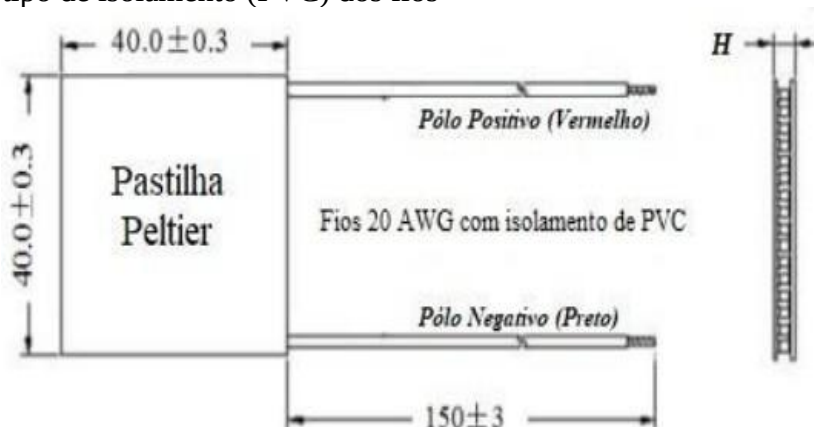
Após a conclusão das etapas experimentais iniciais, baseadas em arranjos com fios condutores metálicos simples (como cobre e ferro), que permitiram a observação direta e didática do efeito Seebeck, a metodologia foi ampliada para incorporar dispositivos termoelétricos mais avançados. A transição do uso de condutores elementares para módulos termoelétricos, cuja estrutura está representada na Figura 10, representou um avanço

significativo na abordagem experimental, permitindo maior controle sobre variáveis operacionais e resultados mais representativos das aplicações reais da termoeletricidade.

Essa mudança metodológica foi motivada tanto pelas limitações observadas nos experimentos com fios especialmente no que se refere à dissipação térmica, à estabilidade das medições e ao alcance das diferenças de potencial geradas quanto pelo objetivo de aprofundar a investigação dos efeitos termoeletricos em contextos mais próximos das aplicações práticas. Dessa forma, buscou-se analisar os fenômenos termoeletricos não apenas em configurações elementares, mas também por meio de dispositivos comerciais otimizados, como os módulos termoeletricos Peltier, que integram múltiplas junções semicondutoras em um único componente compacto e eficiente.

Essa progressão metodológica, do experimental básico ao aplicado, permitiu explorar de forma mais ampla os princípios físicos da termoeletricidade, articulando teoria e prática em diferentes níveis de complexidade e escalabilidade tecnológica.

Figura 10 - Características geométricas das pastilhas Peltier evidenciando o padrão AWG e o tipo de isolamento (PVC) dos fios



Fonte: Arquivo pessoal (2023)

Com o objetivo de investigar experimentalmente as aplicações práticas dos efeitos Seebeck e Peltier, foram desenvolvidos dois protótipos funcionais: um microgerador termoeletrico, voltado à geração de energia a partir de gradientes térmicos, e uma mini geladeira termoeletrica, projetada para demonstrar o potencial de refrigeração direta por meio do uso de módulos Peltier. Cada montagem foi concebida considerando os princípios físicos envolvidos, as limitações dos materiais disponíveis e a viabilidade de replicação em ambiente acadêmico. A escolha dos componentes e instrumentos empregados em ambos os experimentos foi guiada pela necessidade de precisão nas medições e eficiência na transferência de calor. O quadro 1 apresenta, de forma detalhada, os materiais utilizados em cada montagem.

Quadro 1 - Materiais utilizados para montagem do microgerador e da mini geladeira.

Microgerador	Mini geladeira
1 caixa de isopor de 250ml	1 caixa de isopor de 3L
Fios de ferro e cobre	4 Coolers de 210 mm
2 Módulos Peltier 4cm X 4cm	4 Módulos Peltier 4cm X 4cm
1 motor DC de 5V	2 Fontes DC variáveis
1 dissipador 4cm X 8cm	2 dissipadores 4cm X 8cm
1 termômetro analógico	1 termômetro analógico
1 termômetro digital Multímetros	1 termômetro digital Multímetros
Pasta térmica	Pasta térmica

Fonte: Autoria própria (2024)

Os materiais foram cuidadosamente selecionados com base nos objetivos específicos de cada experimento realizado neste trabalho. Para o microgerador termoelétrico, os componentes escolhidos permitiram a investigação prática do efeito Seebeck em uma configuração didática e acessível, utilizando fios metálicos de diferentes composições, módulos termoelétricos de dimensões compatíveis com o sistema construído e um motor DC para evidenciar a conversão da energia térmica em energia elétrica.

Por sua vez, a montagem da mini geladeira termoelétrica exigiu a inclusão de elementos adicionais voltados à otimização do desempenho de refrigeração. Foram empregados múltiplos módulos Peltier, dissipadores de calor de alta eficiência, ventiladores (coolers) de grande vazão e fontes DC variáveis, que possibilitaram o controle preciso da corrente elétrica aplicada aos módulos, contribuindo para maximizar o efeito Peltier e a estabilidade térmica do sistema.

Os instrumentos de medição, como termômetros digitais e analógicos e multímetros de alta precisão, bem como materiais auxiliares, como a pasta térmica, desempenharam um papel essencial na obtenção de dados confiáveis. Eles garantiram tanto a precisão das leituras quanto a eficiência na transferência de calor entre os componentes, aspectos fundamentais para a validação dos resultados obtidos e para a reprodutibilidade experimental.

4.2 MODELAGEM PARA ANÁLISE DO EFEITO SEEBECK

A montagem do protótipo experimental teve como finalidade aprofundar a investigação do efeito Seebeck por meio de um arranjo otimizado, capaz de proporcionar condições estáveis e controláveis para a geração de diferença de potencial a partir de gradientes

térmicos. O sistema foi concebido para aliar simplicidade construtiva a uma eficiência funcional adequada às necessidades didáticas e experimentais propostas neste trabalho. A estrutura principal consistiu em um recipiente de isopor com capacidade volumétrica de 250 ml, escolhido por suas propriedades isolantes térmicas, que permitiram a manutenção de uma região fria estável. Na tampa superior do recipiente foi acoplado um dissipador de calor de alumínio, voltado para o interior da caixa, funcionando como superfície de apoio para os módulos Peltier. A região fria foi composta por uma mistura controlada de água e gelo, cuja proporção foi ajustada de modo a manter uma temperatura próxima de 0 °C durante todo o experimento.

Para otimizar a transferência de calor entre o dissipador interno e os módulos termoelétricos, foi aplicada pasta térmica entre as superfícies de contato, reduzindo significativamente a resistência térmica e melhorando a eficiência do acoplamento térmico. Na face oposta dos módulos, voltada para o ambiente externo, foi acoplado um segundo dissipador de calor, também de alumínio, responsável pela dissipação da energia térmica proveniente do aquecimento controlado. Para aquecer a região quente de maneira gradual e previsível, utilizou-se uma chapa metálica aquecida eletricamente, posicionada acima do dissipador externo. Embora a distribuição de temperatura sobre a superfície do módulo não fosse completamente uniforme, o conjunto apresentou desempenho satisfatório, gerando gradientes térmicos superiores a 50 °C em várias etapas do experimento.

O monitoramento da diferença de temperatura foi realizado com o auxílio de sensores de temperatura um posicionado próximo à interface fria interna e outro na interface quente externa assegurando a medição precisa do gradiente térmico estabelecido entre as extremidades do módulo. Com a estrutura devidamente montada e estabilizada, foi possível acoplar um motor DC ao sistema, com alimentação externa de 3 V, cuja ativação foi utilizada como verificação qualitativa inicial da geração de energia pelo módulo. A etapa seguinte consistiu na variação progressiva da temperatura da face quente, partindo de valores próximos a 100 °C, mantendo-se o lado frio estabilizado em torno de 0 °C. Em cada intervalo de temperatura, registrou-se a diferença de potencial gerada pela célula termoelétrica, com o objetivo de verificar a manutenção da relação linear entre a ddp e o gradiente térmico comportamento teórico previsto pelo efeito Seebeck. A nova configuração demonstrou maior estabilidade e eficiência em comparação aos experimentos preliminares realizados com junções metálicas simples.

A eficácia do sistema em gerar e manter gradientes térmicos controlados foi fundamental para a confiabilidade dos resultados obtidos. A presença simultânea de dissipadores nas duas faces dos módulos Peltier, aliada ao controle térmico da base fria,

assegurou a regulação adequada do fluxo de calor, evitando oscilações abruptas que poderiam comprometer tanto a integridade dos componentes quanto a fidelidade das medições.

É importante destacar que o desempenho do módulo Peltier está intrinsecamente ligado às propriedades físicas dos materiais semicondutores que o compõem, como o coeficiente Seebeck, a resistividade elétrica e a condutividade térmica dos elementos do tipo p e tipo n. Durante os ensaios, observou-se que variações mínimas na temperatura ambiente, na qualidade do contato térmico ou no fluxo de corrente podiam provocar alterações significativas nos valores de ddp registrados. Por essa razão, todos os parâmetros experimentais foram monitorados continuamente e mantidos sob controle rigoroso.

De modo geral, a montagem proposta demonstrou-se eficaz tanto em termos de estabilidade térmica quanto de resposta elétrica, permitindo a observação clara e reproduzível do efeito Seebeck. O arranjo experimental final, ilustrado na Figura 11, evidenciou a viabilidade de sistemas termoelétricos simples como ferramentas didáticas e tecnológicas para o estudo da conversão direta de energia térmica em energia elétrica, com potencial aplicação em dispositivos autônomos de geração de energia e sensoriamento térmico em contextos variados.

Figura 11 - Esquema experimental de um microgerador termoelétrico



Fonte: Arquivo pessoal (2023)

4.3 MODELAGEM PARA ANÁLISE DO EFEITO PELTIER

A montagem do protótipo teve como principal objetivo maximizar a eficiência da transferência de calor dos módulos termoelétricos, garantindo o funcionamento eficaz do

sistema de refrigeração baseado no efeito Peltier. Para isso, foi utilizada uma caixa de isopor com capacidade de 3 litros como estrutura principal da câmara térmica, devido às suas propriedades isolantes, que contribuem para a retenção do frio gerado internamente e minimizam a troca térmica com o meio externo.

Os módulos termoeletrônicos Peltier foram instalados com a face fria acoplada a dissipadores de calor de alumínio, voltados para o interior da câmara térmica, de modo a atuar diretamente na redução da temperatura interna. Para intensificar o efeito refrigerador, foram adicionados coolers de 12 V alinhados aos dissipadores internos, promovendo o fluxo contínuo de ar frio dentro do compartimento e contribuindo para a homogeneização térmica do ambiente. A Figura 12 apresenta o protótipo montado com os componentes descritos.

Figura 12 - Esquema experimental de uma mini geladeira



Fonte: Arquivo pessoal (2023)

A face quente dos módulos foi acoplada a dissipadores de alumínio com ventilação ativa, utilizando coolers voltados para o ambiente externo. Essa configuração teve como finalidade facilitar a remoção eficiente do calor excedente, evitando o superaquecimento dos módulos e preservando o gradiente térmico necessário para o funcionamento contínuo e estável do sistema.

Buscando a configuração mais eficiente para o sistema de ventilação, foram realizados testes experimentais com diferentes orientações dos coolers, avaliando-se principalmente as direções do fluxo de ar: diretamente sobre os dissipadores ou afastando o ar destes. Os resultados demonstraram que a ventilação direcionada diretamente para os dissipadores proporcionou maior eficiência na troca de calor, otimizando a dissipação térmica e elevando o desempenho geral do sistema. Essa configuração foi, portanto, adotada como padrão.

Durante a fase inicial de testes, foram utilizadas fontes de alimentação de corrente contínua estabilizadas para alimentar os módulos termoeletrônicos e os coolers, mantendo os parâmetros elétricos constantes. Essa estabilidade garantiu a reprodutibilidade dos experimentos e facilitou a análise comparativa de desempenho. O monitoramento do funcionamento foi realizado com o auxílio de um multímetro digital, que permitiu a leitura precisa da diferença de potencial aplicada aos módulos, além de um termômetro digital com sensores distribuídos estrategicamente nas regiões interna e externa da câmara térmica. Esses instrumentos foram fundamentais para avaliar tanto a potência elétrica dissipada quanto a eficiência térmica do sistema ao longo das diversas configurações testadas.

Ao longo dos experimentos, diferentes arranjos foram implementados no layout dos coolers, com o objetivo de refinar a dissipação térmica. Os coolers externos, inicialmente voltados para fora do sistema, foram reposicionados para direcionar o fluxo de ar para o centro do dispositivo. Em contrapartida, os coolers internos passaram a direcionar o ar do centro da câmara para as laterais, numa tentativa de melhorar a circulação e a extração do calor residual. Essa nova disposição baseou-se em duas observações principais: o melhor desempenho obtido nos testes preliminares com o reposicionamento dos coolers externos e a hipótese de que a circulação cruzada de ar no interior do sistema poderia aumentar a eficácia da troca térmica na interface entre os dissipadores e os módulos Peltier.

Paralelamente, foi identificado um possível problema de contato térmico insuficiente entre os módulos e os dissipadores, o que poderia comprometer a transferência de calor. Para mitigar essa limitação, aplicaram-se pressões adicionais nos pontos de acoplamento por meio de amarrações com fios de nylon, o que resultou em melhorias perceptíveis no desempenho térmico, ainda que não ideais.

Avançando nos testes, também foi avaliada a influência da orientação individual dos coolers. A inversão da direção de fluxo de um dos ventiladores internos demonstrou ganhos significativos na redução da temperatura interna, tanto na velocidade de resfriamento quanto na temperatura mínima alcançada. Com base nesses resultados, novas combinações foram testadas, incluindo a inversão dos coolers externos correspondentes, com o objetivo de estabelecer uma sinergia eficiente entre os fluxos de ar internos e externos.

A análise comparativa dos dados obtidos em cada configuração permitiu observar padrões de desempenho térmico e identificar as disposições mais eficazes. As iterações sucessivas, acompanhadas de ajustes finos na orientação dos ventiladores, resultaram em uma configuração final estável e otimizada, que permitiu o melhor aproveitamento do potencial de

resfriamento do sistema. Essa configuração foi então consolidada como definitiva, compondo um arranjo de alta eficiência para o protótipo da adega termoelétrica.

Para garantir a confiabilidade dos resultados, a coleta de dados foi realizada com intervalo fixo de cinco minutos entre cada medida, permitindo que o sistema alcançasse estabilidade térmica antes de cada nova leitura. A diferença de potencial aplicada foi mantida constante, tanto nos módulos Peltier quanto nos coolers, com valor médio aferido em aproximadamente 12,035 V. Essa padronização foi essencial para assegurar a uniformidade dos testes e a validade das comparações entre diferentes configurações.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS EFEITOS SEEBECK E PELTIER

Partindo dos conceitos fundamentais relacionados aos materiais termoelétricos e suas propriedades intrínsecas, este trabalho realizou uma investigação experimental dos efeitos Seebeck e Peltier, buscando compreender o desempenho prático desses fenômenos. Foram exploradas as capacidades dos dispositivos termoelétricos em converter gradientes térmicos em energia elétrica, bem como em promover resfriamento eficiente em sistemas isolados, sem o uso de componentes móveis ou fluidos refrigerantes. Os resultados obtidos evidenciam o potencial dessas tecnologias para aplicações sustentáveis, especialmente em contextos que demandam baixo consumo energético e operação silenciosa.

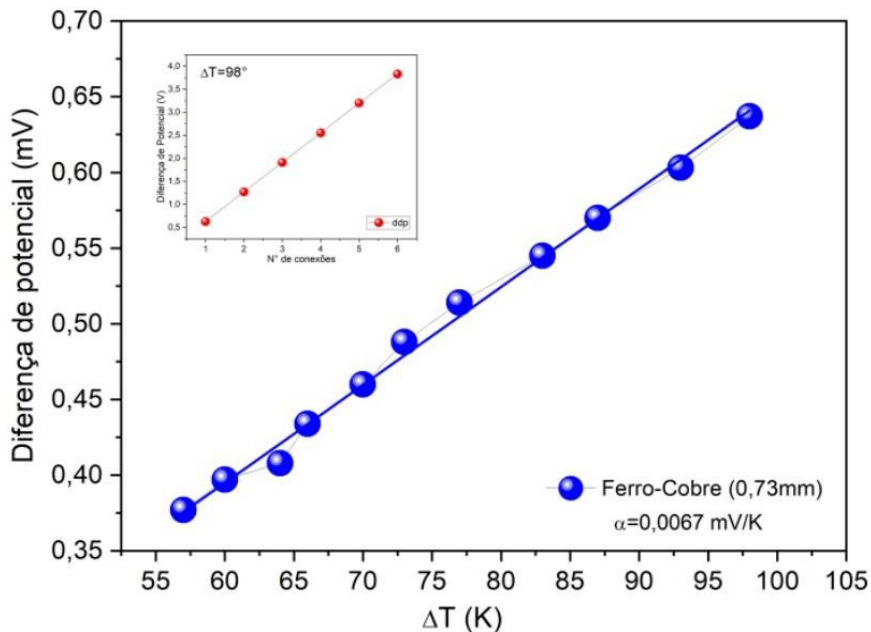
5.2 ANÁLISE DO EFEITO SEEBECK COM FIOS METÁLICOS

Os experimentos iniciais buscaram demonstrar didaticamente o efeito Seebeck utilizando fios metálicos de diferentes materiais, especificamente fios de ferro e cobre com diâmetro de 0,73 mm. Essa etapa teve como propósito evidenciar, de forma simples e direta, o princípio físico que rege o funcionamento de geradores termoelétricos: a criação de uma diferença de potencial elétrico quando há a aplicação de um gradiente de temperatura entre duas junções metálicas distintas.

Fisicamente, ao se conectar dois metais diferentes, há uma distribuição uniforme de portadores de carga na região da junção. Quando um diferencial de temperatura é imposto, ocorre a movimentação de elétrons ou lacunas da região mais quente para a mais fria, devido à diferença de energia térmica, gerando, assim, uma diferença de potencial elétrico que pode ser convertida em corrente elétrica em um circuito externo. Esse fenômeno é resultado direto do coeficiente Seebeck dos materiais envolvidos, que representa a quantidade de ddp gerada por unidade de diferença de temperatura aplicada.

Nos experimentos realizados, as medições com apenas uma conexão ferro-cobre apresentaram diferenças de potencial da ordem de décimos de milivolt, resultando em um coeficiente Seebeck experimental médio de aproximadamente 0,0067 mV/K, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Diferença de potencial produzida por fios de cobre e ferro ligados em conexões simples, demonstrando o poder termoelétrico dessas junções



Fonte: Autoria própria (2024)

Embora o valor absoluto da diferença de potencial obtida nos experimentos com fios metálicos seja relativamente baixo quando comparado aos módulos termoelétricos semicondutores comerciais, essa limitação é esperada e encontra respaldo na literatura especializada. Materiais metálicos comuns, como cobre e ferro, apresentam coeficientes Seebeck baixos, tipicamente da ordem de poucos microvolts por grau Celsius (Goldsmid, 2010; Ioffe, 1957), o que restringe a magnitude da tensão termoelétrica gerada por junções simples.

Estudos indicam que, para metais convencionais, a conversão termoelétrica é limitada devido à alta condutividade elétrica e térmica simultâneas, que minimizam a eficiência do efeito Seebeck (Rowe, 2006). Por outro lado, módulos termoelétricos semicondutores comerciais são fabricados a partir de materiais especialmente selecionados, como bismuto-telureto (Bi_2Te_3) e suas ligas, que apresentam coeficientes Seebeck significativamente maiores, resistividade elétrica otimizada e baixa condutividade térmica, proporcionando valores de tensão e eficiência muito superiores (Snyder; Toberer, 2008; Bell, 2008).

No presente trabalho, os resultados experimentais demonstraram claramente que a ddp gerada aumenta linearmente com o número de junções conectadas em série, conforme ilustrado no gráfico do canto superior esquerdo da Figura 13. Esse comportamento é coerente com o modelo clássico do efeito Seebeck, que prevê soma das contribuições individuais de cada junção para a tensão total do sistema (Ioffe, 1957). A obtenção de valores maiores com seis

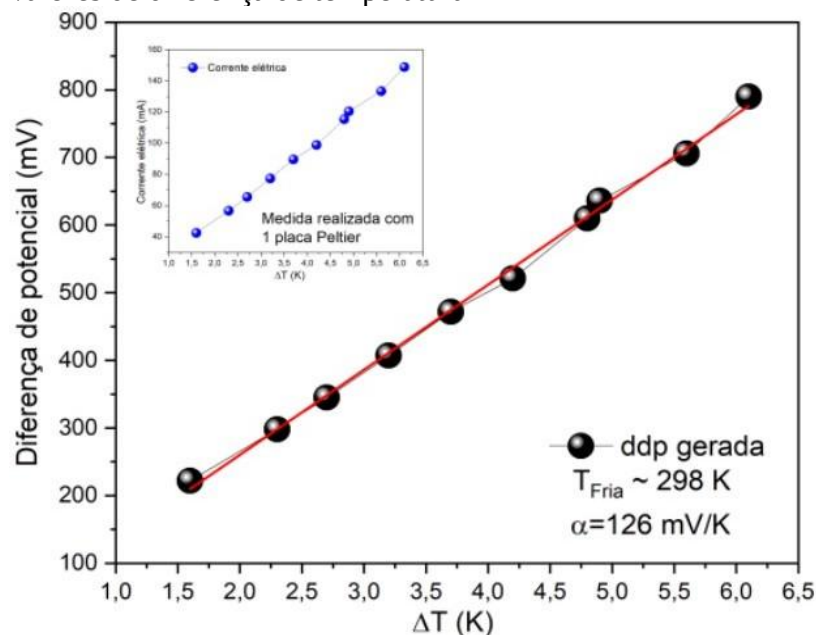
junções, para um gradiente térmico médio de cerca de 98 °C, confirma a aplicabilidade dessa estratégia para amplificação da tensão termoelétrica.

Esses achados reforçam a compreensão de que, embora os pares metálicos apresentem desempenho modesto isoladamente, a configuração em série base estrutural dos módulos termoelétricos comerciais permite atingir níveis práticos de geração elétrica (Goldsmid, 2010; Rowe, 2006). Assim, o experimento não apenas valida os fundamentos teóricos da termoeletricidade, mas também enfatiza a importância dos materiais semicondutores e do projeto de múltiplas junções para aplicações reais em conversão de energia térmica.

5.3 ANÁLISE DO EFEITO SEEBECK EM MÓDULOS TERMOELÉ-TRICOS COMERCIAIS

Em seguida, foi realizada a análise do efeito Seebeck em módulos termoelétricos comerciais, compostos por 127 pares de junções semicondutoras tipo p e n conectadas eletricamente em série e termicamente em paralelo. A utilização desses dispositivos visa potencializar a geração termoelétrica, pois o grande número de junções amplifica proporcionalmente a ddp gerada a partir de um mesmo gradiente de temperatura. Os resultados demonstraram diferenças de potencial da ordem de volts, mesmo para pequenas diferenças de temperatura aplicadas entre as faces do módulo.

Figura 14 - Diferença de potencial produzida por uma única placa Peltier utilizando baixos valores de diferença de temperatura



Fonte: Autoria própria (2024)

Na Figura 14 observa-se que os resultados obtidos com os módulos termoeletricos comerciais demonstram um desempenho significativamente superior ao observado em arranjos simples de fios metálicos, refletindo as propriedades intrínsecas e a estrutura otimizada desses dispositivos. Conforme evidenciado na literatura, os módulos termoeletricos baseados em ligas semicondutoras como Bi₂Te₃ apresentam coeficientes Seebeck elevados, resistência elétrica controlada e condutividade térmica reduzida, características fundamentais para a eficiência na conversão termoeletrica (Snyder; Toberer, 2008; Bell, 2008).

Estudos experimentais similares reportam coeficientes Seebeck na faixa de centenas de milivolts por kelvin, compatíveis com os valores aqui obtidos, o que reforça a validade dos procedimentos adotados e a qualidade dos dispositivos utilizados (Bakker; Paranthaman, 2019). Além disso, a linearidade observada entre a diferença de potencial gerada e o gradiente térmico aplicado corrobora os princípios físicos fundamentais do efeito Seebeck, confirmados em diferentes escalas e contextos experimentais.

A capacidade dos módulos em gerar correntes na ordem de centenas de miliampères mesmo sob gradientes térmicos relativamente modestos destaca seu potencial para aplicações práticas em sistemas de microgeração de energia, sensores térmicos e dispositivos autônomos de baixo consumo (Patel *et al.*, 2021). Esta versatilidade, aliada à ausência de partes móveis e à facilidade de integração em sistemas compactos, posiciona os módulos termoeletricos como uma tecnologia promissora para soluções sustentáveis de conversão de energia e controle térmico.

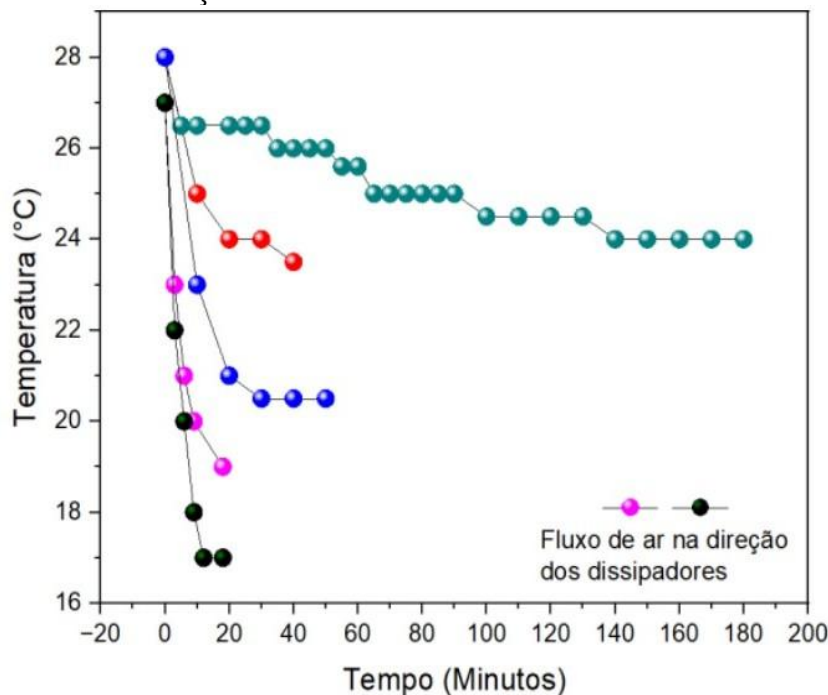
Além disso, a literatura enfatiza a importância do gerenciamento térmico, como a utilização de dissipadores eficientes e sistemas de ventilação adequados, para maximizar a diferença de temperatura entre as faces do módulo e, consequentemente, seu desempenho (Rowe, 2006). Os cuidados metodológicos implementados neste trabalho, tais como a aplicação de pasta térmica, a escolha criteriosa dos dissipadores e a configuração otimizada dos coolers, estão alinhados com essas recomendações, contribuindo para a obtenção de resultados reprodutíveis e representativos.

Dessa forma, os achados experimentais reforçam o potencial dos módulos termoeletricos comerciais não apenas como ferramentas didáticas para demonstração dos efeitos termoeletricos, mas também como componentes viáveis para o desenvolvimento de dispositivos eficientes de geração de energia e refrigeração em aplicações tecnológicas emergentes.

5.4 ANÁLISE DO EFEITO PELTIER EM APLICAÇÕES DE REFRIGERAÇÃO

A análise do efeito Peltier revelou uma capacidade significativa de resfriamento quando os módulos termoelétricos são devidamente acoplados a sistemas de gerenciamento térmico eficientes. Os dados experimentais indicaram uma queda abrupta da temperatura interna do sistema após a aplicação de uma diferença de potencial de 12 V, atingindo uma redução de aproximadamente 11°C nos primeiros 15 minutos de operação. Este comportamento confirma o princípio fundamental do efeito Peltier, no qual a passagem de corrente elétrica através da junção entre materiais semicondutores tipo p e tipo n resulta na absorção de calor em uma das faces do módulo, promovendo o resfriamento local.

Figura 15 - Dados referentes a diferentes medidas de acordo com a direção da ventilação dos coolers em relação aos trocadores de calor



Fonte: Autoria própria (2024)

A resposta térmica do sistema seguiu uma curva com tendência exponencial, típica de dispositivos termoelétricos submetidos a ciclos de resfriamento, estabilizando-se em regime quase-estacionário após cerca de 20 minutos de operação. Esse comportamento está alinhado com modelos termodinâmicos já estabelecidos, os quais descrevem a aproximação assintótica ao equilíbrio térmico como resultado da competição entre a taxa de remoção de calor via efeito Peltier e as perdas térmicas por condução, convecção natural e dissipação Joule (Rowe, 2006).

A influência da direção do fluxo de ar gerado pelos ventiladores nos dissipadores de calor também foi evidenciada. As configurações que direcionaram o fluxo de ar diretamente sobre os dissipadores resultaram em melhor desempenho térmico, ao favorecerem uma extração mais eficiente do calor das superfícies quentes. Isso contribuiu para a manutenção de um gradiente térmico mais elevado entre as faces do módulo, o que é crucial para a continuidade e a intensidade do efeito Peltier. Trabalhos anteriores, como os de Rowe e Min (1992) e Patel *et al.* (2021), já indicavam a importância crítica da convecção forçada no desempenho de sistemas termoelétricos, ressaltando que a eficiência térmica está diretamente associada à eficácia do gerenciamento de calor.

Mesmo utilizando módulos de baixa potência, os resultados confirmam o potencial desses dispositivos para aplicações reais em refrigeração localizada, especialmente em contextos que demandam soluções compactas, sem partes móveis e com baixo consumo energético. A eficiência observada, mesmo sob condições térmicas e elétricas limitadas, reforça o que é reportado na literatura sobre a viabilidade dos módulos termoelétricos em sistemas embarcados, microclimatização e equipamentos portáteis (Snyder; Toberer, 2008).

Adicionalmente, estima-se que o desempenho global desses sistemas possa ser ampliado com a utilização de módulos de maior capacidade, controle térmico mais refinado, e estratégias de integração térmica e elétrica otimizadas. A associação em paralelo e o uso de dissipadores de alta performance já são práticas recomendadas em projetos comerciais e experimentais com foco em eficiência térmica e sustentabilidade energética (Bell, 2008).

Assim, os resultados obtidos nesta investigação não apenas comprovam a operacionalidade do efeito Peltier em condições controladas, como também reforçam seu potencial de aplicação em soluções modernas de refrigeração, alinhadas a princípios de eficiência energética e engenharia sustentável.

6 CONCLUSÃO

Os experimentos realizados neste trabalho permitiram comprovar, de forma clara e quantitativa, a existência e aplicabilidade dos efeitos termoeletricos de Seebeck e Peltier, revelando seu potencial em soluções tecnológicas sustentáveis e de baixo consumo energético. A partir das análises desenvolvidas, foi possível constatar que a conversão direta de energia térmica em energia elétrica, bem como o resfriamento de sistemas por meio de corrente elétrica, são fenômenos viáveis e reproduzíveis em laboratório, mesmo com recursos acessíveis.

No caso do efeito Seebeck, a comparação entre diferentes configurações experimentais incluindo fios metálicos simples e módulos termoeletricos comerciais demonstrou a superioridade dos materiais semicondutores no desempenho termoeletrico. Enquanto os pares metálicos apresentaram valores de ddp relativamente baixos, os módulos termoeletricos alcançaram tensões próximas de 0,5 V com gradientes térmicos modestos 4 K, evidenciando um coeficiente Seebeck experimental da ordem de 126 mV/K. Esses resultados confirmam o comportamento teórico previsto e indicam a viabilidade de uso desses dispositivos em sensores térmicos, microgeradores de energia e sistemas embarcados de monitoramento.

Adicionalmente, os testes com múltiplas junções em série reforçaram o princípio de funcionamento dos módulos termoeletricos, revelando que o aumento da quantidade de pares condutores resulta em uma elevação linear na diferença de potencial gerada. Essa constatação é fundamental para compreender a escalabilidade dos sistemas termoeletricos, um fator chave no desenvolvimento de tecnologias eficientes.

Em relação ao efeito Peltier, os dados experimentais evidenciaram uma significativa redução da temperatura em um sistema termicamente isolado, mesmo utilizando módulos de baixa potência. A queda de aproximadamente 11°C em menos de 15 minutos demonstra o potencial desses dispositivos para aplicações de refrigeração localizada. Além disso, verificou-se que o desempenho dos módulos está fortemente condicionado ao gerenciamento térmico adequado incluindo o uso de dissipadores de calor e ventiladores corretamente orientados, elementos cruciais para a manutenção de um gradiente térmico eficiente entre as faces do módulo.

Embora os efeitos termoeletricos ainda enfrentem limitações em aplicações de larga escala, principalmente devido à eficiência relativamente baixa e ao custo de materiais com alto desempenho, os resultados obtidos neste trabalho reforçam seu papel estratégico em soluções específicas e emergentes. Dispositivos termoeletricos oferecem operação silenciosa, ausência

de partes móveis, durabilidade elevada e potencial para miniaturização características que os tornam altamente atrativos em aplicações médicas, eletrônicas, aeroespaciais e ambientais.

Do ponto de vista da sustentabilidade, destaca-se a contribuição dos módulos termoelétricos para tecnologias limpas. No efeito Seebeck, a possibilidade de converter calor residual em energia elétrica contribui para a eficiência energética de sistemas já existentes, enquanto o efeito Peltier dispensa o uso de gases refrigerantes nocivos, alinhando-se às metas globais de redução de impactos ambientais. Assim, os efeitos termoelétricos se apresentam como alternativas promissoras no desenvolvimento de soluções tecnológicas sustentáveis e integradas ao cotidiano.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros explorem a utilização de módulos de maior potência, o aprimoramento de técnicas de dissipação térmica, a integração com sistemas de armazenamento de energia e a caracterização de novos materiais com coeficientes Seebeck elevados. Tais avanços poderão ampliar significativamente o desempenho, a eficiência e a aplicabilidade dos dispositivos termoelétricos em diversos setores da ciência, da engenharia e da sociedade.

REFERÊNCIAS

- BAKKER, M. G.; PARANTHAMAN, M. P. Experimental studies of commercial thermoelectric generators under varying thermal loads. **Energy Conversion and Management**, 180, 395-403, 2019.
- BANDARU, S.; JASTRZĘBSKA, A. M.; BIROWSKA, M. Recent progress in thermoelectric MXene-based structures versus other 2D materials. **arXiv**, p. 1-25, 2023. Disponível em: [arXiv:2304.07015](https://arxiv.org/abs/2304.07015). Acesso em: 24 jun. 2025.
- BASSALO, J. M. F. Curiosidades da Física. **UFC**, 2019. Disponível em: <https://seara.ufc.br/wp-content/uploads/2019/03/folclore521.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2025.
- BATHULA, S. *et al.* The role of nanoscale defect features in enhancing the thermoelectric performance of p-type nanostructured sige alloys. **Nanoscale, Royal Society of Chemistry**, v. 7, n. 29, p. 12474–12483, 2015. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/nr/c5nr01786f>. Acesso em: 30 abr. 2025.
- BEEBY, S.; CAO, Z.; ALMUSSALLAM, A. Kinetic, thermoelectric and solar energy harvesting technologies for smart textiles. In: KIRSTEIN, T. (ed.). **Multidisciplinary Know-How for Smart Textiles Developers**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2013. p. 306–328.
- BELL, L. E. Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. **Science**, v. 321, n. 5895, p. 1457–1461, 2008. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscaador.html?task=detalhes&id=W2041532378>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- BERETTA, D. *et al.* Thermoelectrics: From history, a window to the future. **Materials Science and Engineering**, v. 138, p. 100501, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927796X18301566>. Acesso em: 28 jun. 2025.
- BOTAN, M. C. O. **Fundamentos da conversão termelétrica direta**. Brasil: Editora e Livraria Cabral, 2014.
- CAMPOS, A. L. P. S. *et al.* Refrigeração utilizando pastilhas de efeito peltier. **HOLOS**, v. 2, p. 25–31, 2010. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/383>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- CAVALCANTI, M. J. P. **Fundamentos de Eletrotécnica**. 21. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1997.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade do Ar no Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2011. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/items/14e553ff-13ae-4b4f-a878-5d50ac0fc51f>. Acesso em: 24 jun. 2025.
- CIMM. Centro de Informação Metal Mecânica. Novo material quebra recorde mundial na conversão de calor em eletricidade. **CIMM**, 2022. Disponível em:

https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/19170-novo-material-quebra-recorde-mundial-na-conversao-de-calor-em-eletricidade. Acesso em: 23 abr. 2025.

EMILIAVACA, A. *et al.* Desenvolvimento de um dispositivo para ciclagem térmica usando módulos peltier. In.: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 7, São Luís, 2012. **Anais...** São Luís: ABCM, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328789006_DESENVOLVIMENTO_DE_UM_DISPOSITIVO_PARA_CICLAGEM_TERMICA_USANDO_MODULO_PELTIER. Acesso em: 20 jun. 2025.

FU, C. *et al.* Realizing high figure of merit in heavy-band p-type half-heusler thermoelectric materials. **Nat commun**, v. 6, n. 1, p. 8144, 2015. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4569725/>. Acesso em: 01 jun. 2025.

GOLDEMBERG, J. Termoeletricidade e a Energia Nuclear no País. **USP**, 2012. Disponível em: <https://www.iee.usp.br/sites/default/files/biblioteca/producao/2012/Livros/goldembergtermoeletricidade.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2025.

GOLDSMID, H. J. **Introduction to thermoelectricity**. Berlim: Springer Science & Business Media, 2010.

GREBENKEMPER, J. H. *et al.* Effects of sc and y substitution on the structure and thermoelectric properties of yb14mnsb11. **Journal of Solid State Chemistry**, v. 242, p. 55-61, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022459616300883>. Acesso em: 30 maio 2025.

HE, J.; TRITT, T. M. Advances in thermoelectric materials research: strategy, performance, and applications. **Science**, v. 357, n. 6358, p. 1-9, 2017. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aak9997>. Acesso em: 20 abr. 2025.

IOFFE, A. F. **Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling**. London: Infosearch Limited, 1957.

IZIDORO, C. L. **Desenvolvimento de uma bancada didática para estudo dos efeitos termoeletrônicos aplicados na engenharia**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/130128>. Acesso em: 26 jun. 2025.

JUNIOR, O. H. A. **Protótipo de um microgerador termoeletrico para captação de energias residuais baseado no Efeito Seebeck com sistema de transferência de calor intercambiável**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2014. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/103721>. Acesso em: 27 jun. 2025.

MAHAN, G.; SOFO, J. The best thermoelectric. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 93, n. 15, p. 7436–7439, 1996. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC38761/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

PASTILHA de Peltier 15.4V 63W 40x40mm TEC1-12706 Chip SCE. **Eletroinfo CIA**, 2025. Disponível em: <https://www.eletroinfocia.com.br/pastilha-de-peltier-15-4v-63w-40x40mm-tec1-12706-chip-sce>. Acesso em: 2 jun. 2025.

PATEL, D. *et al.* Design and characterization of thermoelectric microgenerators for IoT applications. **Applied Energy**, v. 293, p. 116911, 2021.

POLOZINE, A.; SIROTINSKAYA, S.; SCHAEFFER, L. History of development of thermoelectric materials for electric power generation and criteria of their quality. **Materials Research**, v. 17, n. 5, p. 1220–1226, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/6pQV5d6yY7dQfJj4pWNdyTv/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 25 jun. 2025.

POUDEL, B. *et al.* High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys. **Science**, v. 320, n. 5876, p. 634–638, 2008. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18356488/>. Acesso em: 02 jun. 2025.

RIBEIRO, P. de F. R. V.; BRAGA, R. F.; REZENDE, E. N. A importância da energia solar no desenvolvimento sustentável e os rumos da política pública para incentivo a essa fonte renovável no Brasil. **Revista de Direito e Sustentabilidade**, v. 8, n. 1, 2022. Disponível em: <https://indexlaw.org/index.php/revistards/article/view/8810/pdf>. Acesso em: 20 jun. 2025.

RIFFAT, S. B.; MA, X. A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications. **Applied Thermal Engineering**, v. 66, n. 1-2, p. 15–24, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/260313637_A_review_of_thermoelectric_cooling_Materials_modeling_and_applications. Acesso em: 27 jun. 2025.

ROWE, D. M. **CRC Handbook of Thermoelectrics**. Flórida: CRC Press, 1995.

ROWE, D. M. **Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano**. Flórida: CRC Press, 2006.

ROWE, D. M.; MIN, G. Evaluation of thermoelectric modules for power generation. **Journal of Materials Science Letters**, v. 11, p. 1105–1107, 1992. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1998JPS....73..193R/abstract>. Acesso em: 30 jun. 2025.

SAINI, S. *et al.* Terbium ion doping in $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$: A step towards high-performance thermoelectric materials. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 44621, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/315474550_Terbium_Ion_Doping_in_Ca3Co4O9_A_Step_towards_High-Performance_Thermoelectric_Materials. Acesso em: 1 jun. 2025.

SILVA, J. A. da; LUIZ, A. M. A relevância da metrologia no ensino médio. In.: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 16, Rio de Janeiro. **Anais...** CEFET/RJ: Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <https://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xvi/cd/>. Acesso em: 20 abr. 2025.

SNYDER, G. J.; TOBERER, E. S. Complex thermoelectric materials. **Nature Materials**, v. 7, n. 2, p. 105–114, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/5633071_Complex_Thermoelectric_Materials. Acesso em: 20 maio 2025.

SNYDER, G. J.; URSELL, T. S. Thermoelectric efficiency and compatibility. **Physical Review Letters**, v. 91, n. 14, p. 148301, 2003. Disponível em: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.91.148301>. Acesso em: 30 maio 2025.

THAKKAR, M. P. **A report on "Peltier (thermoelectric) cooling module"**. Gujarat: Pandit Deendayal Petroleum University, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/292976771_A_report_on_Peltier_thermoelectric_cooling_module. Acesso em: 30 abr. 2025.
v. 21, n. 11, p. 1-32, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/e21111058>. Acesso em: 02 jun. 2025.

WOLF, M.; HINTERDING, R.; FELDHOFF, A. Alto fator de potência vs. alto zT – uma revisão de materiais termoelétricos para aplicações em alta temperatura. **Entropy**,

YAMASHITA, O. A thermoelectric module and its application in precise temperature control. **Thermoelectric Materials and Devices**, v. 19, p. 55–72, 2012. Disponível em: <https://dspace.mist.ac.bd/xmlui/bitstream/handle/123456789/425/complete-2.pdf?sequence=1&iAllowed=y>. Acesso em: 22 jun. 2025.

ZHANG, X.; ZHAO, L. D. Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity. **Journal of Materiomics**, v. 1, n. 2, p. 92–105, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352847815000258>. Acesso em: 26 jun. 2025.

ZHAO, L. D. *et al.* Advances in thermoelectrics: From single-phases to hierarchical nanostructures and back. Cambridge University Press, v. 39, n. 9, p. 885–893, 2014a. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-bulletin/article/12F5A64234C936A25735AC902F6EEE53>. Acesso em: 26 jun. 2025.

ZHAO, L. D. *et al.* Ultralow thermal conductivity and high thermoelectric figure of merit in SnSe crystals. **Nature**, v. 508, p. 373–377, 2014b. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature13184>. Acesso em: 30 jun. 2025.