

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GUILHERME BRUZZA ALMEIDA

**DESENVOLVIMENTO DE GERADORES TERMOELÉTRICOS PARA
APLICAÇÃO EM SISTEMAS ISOLADOS**

**Bagé
2025**

GUILHERME BRUZZA ALMEIDA

**DESENVOLVIMENTO DE GERADORES TERMOELÉTRICOS PARA
APLICAÇÃO EM SISTEMAS ISOLADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energia da Universidade Federal do Pampa,
como requisito parcial para obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia de
Energia

Orientador: Alexandre F. Galio

**Bagé
2025**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

A447d Almeida, Guilherme

DESENVOLVIMENTO DE GERADORES TERMOELÉTRICOS
PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS ISOLADOS / Guilherme Almeida.
74 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIA, 2025.

Orientação: Alexandre Galio.

1. Geração Termoelétrica. 2. Gerador Termoelétrico. 3. Efeito Seebeck. 4. Forno Solar. 5. Resfriamento Submerso. I. Título.

GUILHERME BRUZZA ALMEIDA

**DESENVOLVIMENTO DE GERADORES TERMOELÉTRICOS PARA APLICAÇÃO
EM SISTEMAS ISOLADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Energia da
Universidade Federal do Pampa, como requisito
parcial para obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia de Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 27 de julho de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Ferreira Galio - Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dra.. Sabrina Neves da Silva
UNIPAMPA

Prof. Dr.. Enoque Dutra Garcia
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **SABRINA NEVES DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/06/2025, às 11:29, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ENOQUE DUTRA GARCIA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/06/2025, às 11:45, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALEXANDRE FERREIRA GALIO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/06/2025, às 11:47, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1768830** e o código CRC **14D12879**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao Dr. Alexandre Ferreira Galio, cuja orientação, paciência e dedicação foram essenciais para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso. Sua disponibilidade para compartilhar conhecimento e oferecer suporte em cada etapa do processo foi determinante para o sucesso deste trabalho.

Estendo minha gratidão a todos os professores do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), que, ao longo desses anos, contribuíram para minha formação acadêmica e profissional, compartilhando não apenas conhecimento técnico, mas também valores e experiências que levarei para a vida toda.

Sou imensamente grato à UNIPAMPA por me proporcionar uma educação pública, gratuita e de qualidade, permitindo que eu me desenvolvesse em um ambiente de aprendizado rico e inclusivo. A infraestrutura, os recursos disponibilizados e o compromisso com o ensino superior foram fundamentais para minha trajetória acadêmica.

Agradeço de coração à minha família, por todo amor, apoio e incentivo incondicional ao longo dessa caminhada. Vocês foram minha força nos momentos difíceis e meu maior motivo para seguir em frente. Sou grato também às pessoas especiais que estiveram ao meu lado, me encorajando e acreditando no meu potencial mesmo quando as dificuldades surgiam.

Por fim, quero expressar minha gratidão especial aos meus colegas e amigos Adrian Gularte de Vargas, Eduardo Ferreira Leite, John Roger Roldan Aleixo, Thiago Quadros dos Santos e Victor Augusto Deliberal Camargo, que estiveram ao meu lado ao longo dessa jornada. Compartilhamos risadas, superamos desafios e vivenciamos momentos de aprendizado e crescimento que tornaram essa experiência única e marcante. Vocês foram mais do que colegas; foram verdadeiros irmãos de caminhada, e sou muito grato por essa amizade.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação e para a concretização deste Trabalho, o meu muito obrigado!

“Nascer, morrer, renascer ainda e progredir sempre, tal é a lei.”

Allan Kardec

RESUMO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo desenvolver um sistema integrado de geração termoelétrica (TEG, sigla em inglês de *Thermoelectric Generator*) para aplicação em sistemas isolados. Para isso, utilizou-se uma placa Peltier associada a uma estrutura física projetada para maximizar a transferência de calor, explorando a diferença de temperatura entre as faces da placa. O sistema foi idealizado para possível aplicação em locais como rios ou barragens, onde a temperatura da água se mantém inferior à temperatura ambiente. A estrutura foi construída em uma caixa de poliestireno, cuja parte interna funciona como um forno solar, permitindo que o TEG absorva energia térmica por meio de uma aleta acoplada. Na face oposta da placa, foi instalada uma segunda aleta submersa na água, a fim de melhorar a dissipação de calor do sistema. Para otimizar o aquecimento, peças de poliestireno foram utilizadas para restringir a área de absorção de calor, enquanto as paredes internas da caixa foram revestidas com papel alumínio, refletindo a radiação solar. A vedação da caixa foi feita com filme PVC e uma placa de vidro, criando um efeito estufa que eleva a temperatura na extremidade quente do TEG. Foram realizados dois experimentos. No primeiro, o sistema foi testado sem o resfriamento submerso, comparando-se o uso de filme PVC e vidro como isolantes. No segundo experimento, avaliou-se a eficiência do sistema com o resfriamento submerso. Os resultados indicaram que o sistema com vedação de vidro apresentou uma eficiência térmica 12,93% superior à do sistema com papel filme. Na segunda fase, comparou-se o sistema sem resfriamento com aquele resfriado em água. O sistema sem resfriamento atingiu uma temperatura máxima de 80,30 °C e uma variação de temperatura de 36,10 °C, enquanto o sistema com resfriamento submerso alcançou 72,80 °C, com variação de 38,20 °C. Este último gerou uma potência máxima de 2,91 mW, sendo 37,80% superior à do sistema sem resfriamento, que gerou 1,81 mW. Concluiu-se que o sistema com resfriamento submerso apresentou melhor desempenho para maximizar a geração de energia térmica, demonstrando sua viabilidade para aplicações em ambientes isolados.

Palavras-Chave: Geração Termoelétrica (TEG); Placa de Peltier; Forno Solar; Transferência de Calor; Resfriamento Submerso.

ABSTRACT

This Final Undergraduate Project aimed to develop an integrated thermoelectric generation system (TEG, short for Thermoelectric Generator) for application in isolated environments. A Peltier module was used in conjunction with a physical structure designed to maximize heat transfer by exploiting the temperature difference between the module's two sides. The system was conceived for potential use in locations such as rivers or dams, where water temperature remains lower than the ambient temperature. The structure was built using a polystyrene box, whose interior functions as a solar oven, allowing the TEG module to absorb thermal energy through an attached fin. On the opposite side of the module, a second fin was submerged in water to enhance heat dissipation. To optimize heating, polystyrene pieces were used to restrict the heat absorption area, and the inner walls of the box were covered with aluminum foil to reflect solar radiation. The box was sealed with plastic film and a glass plate, creating a greenhouse effect that increased the temperature on the hot side of the TEG module. Two experiments were carried out. In the first, the system was tested without water cooling, comparing the use of plastic film and glass as sealing materials. In the second experiment, the system's performance with submerged cooling was evaluated. Results showed that the system sealed with glass exhibited 12.93% higher thermal efficiency than the system sealed with plastic film. In the second phase, the system without cooling reached a maximum temperature of 80.30 °C and a temperature difference of 36.10 °C, while the water-cooled system reached 72.80 °C, with a temperature difference of 38.20 °C. The latter generated a maximum power output of 2.91 mW, which was 37.80% higher than the system without cooling, which produced 1.81 mW. It was concluded that the water-cooled system demonstrated better performance in maximizing thermal energy generation, highlighting its viability for use in isolated environments.

Keywords: Thermoelectric Generation (TEG); Peltier Plate; Solar Oven; Heat Transfer; Submerged Cooling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema de um dispositivo TEG com um único par termoelétrico e dois pólos.	24
Figura 2- Esquema de um dispositivo TEG com n pares termoelétricos.	26
Figura 3 - Circuito equivalente de um dispositivo TEG.	28
Figura 4 - Projeto do sistema TEG.	34
Figura 5 - Placa Peltier.	34
Figura 6 - Aleta de aquecimento.	35
Figura 7 - Aleta de resfriamento.	36
Figura 8 - Placa de Poliestireno.	36
Figura 9 - Sistema isolado com Poliestireno e papel alumínio.	37
Figura 10 - Sistema isolado com Poliestireno, papel alumínio e fita isolante.	38
Figura 11 - Sistema isolado com Poliestireno, papel alumínio e fita isolante.	38
Figura 12 - Display Termometro Digital com Sonda NTC.	39
Figura 13 - Termopar tipo K.	39
Figura 14- Sistema isolado com filme PVC.	40
Figura 15- Sistema isolado com filme PVC.	41
Figura 16 - Sistema isolado com filme PVC e vidro.	41
Figura 17 - Multímetro Icel Manaus MD-6490.	42
Figura 18 - Multímetro FoxLux FX-MD.	42
Figura 19 - Isolado com filme PVC (sem resfriamento submerso).	44
Figura 20 - Registro de dados.	44
Figura 21 - Registro de dados experimento 2	45
Figura 22 - Isolado com filme PVC e vidro (sem resfriamento submerso).	46
Figura 23 - Isolado com filme PVC e vidro (com resfriamento submerso).	47
Figura 24 - Obtenção de dados - isolado com filme PVC e vidro (com resfriamento submerso).	47
Figura 25 - Condições de temperatura dia 24/11/2024.	48
Figura 26 - Gráfico de temperatura vs tempo - experimento 1	49
Figura 27 - Gráfico de variação de temperatura vs tempo - experimento 1	50
Figura 28 - Gráfico de potência vs tempo - experimento 1	50
Figura 29- Condições de temperatura para o dia 29/11/2024.	51
Figura 30 - Gráfico da T quente e T frio do experimento 2.	52
Figura 31 - Gráfico da variação de temperatura por tempo do experimento 2.	52
Figura 32- Gráfico da potência por tempo do experimento 2.	53
Figura 33- Gráfico de comparação da T quente do experimento 1 e 2.	53
Figura 34 - Gráfico de comparação da variação de temperatura do experimento 1 e 2.	54
Figura 35 - Condições de temperatura dia 29/11/2024 experimento 3.	54
Figura 36 - Gráfico da T quente e T frio do experimento 3.	56
Figura 37 - Gráfico da variação de temperatura do experimento 3.	56
Figura 38 - Gráfico da potência por tempo, do experimento 3.	57
Figura 39 - Gráfico de comparação do T quente do experimento 2 e 3.	58
Figura 40 - Gráfico de comparação da variação de temperatura, no experimento 2 e 3.	58
Figura 41 - Gráfico de comparação das potências do experimento 2 e 3..	59

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Coeficiente de Seebeck	20
Equação 2 - Coeficiente de Seebeck em relação ao campo elétrico.	21
Equação 3 - Calor do efeito Thomson	21
Equação 4 - Coeficiente de Seebeck	22
Equação 5 - Coeficiente de Thomson	22
Equação 6 - Resistência interna equivalente.	25
Equação 7 - Condutância térmica equivalente.	25
Equação 8 - Resistência térmica equivalente	25
Equação 9 - Condutância térmica equivalente.	26
Equação 10 - Resistência interna equivalente.	26
Equação 11 - Tensão nos terminais.	26
Equação 12 - Corrente elétrica de entrada no circuito.	26
Equação 13 - Potência elétrica de saída entregue pelo TEG.	27
Equação 14 - Potência elétrica de saída absorvida pela carga.	28
Equação 15 - Potência elétrica de saída absorvida pela resistência.	28
Equação 16 - Potência elétrica máxima de saída de um TEG.	28
Equação 17 - Corrente Máxima.	28
Equação 18 - Taxa de fluxo de calor absorvido.	29
Equação 19 - Figura de mérito médio - ZT_{avg}	31
Equação 20 - Eficiência de conversão teórica.	32
Equação 21 - Figura de mérito.	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Experimento 1 Isolado com filme PVC - sem resfriamento submerso	46
Tabela 2- Experimento 2 Isolado com filme PVC e vidro - sem resfriamento submerso	50
Tabela 3 - Experimento 3 Isolado com filme PVC e vidro -com resfriamento submerso	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TEG	Thermoelectric Generator (Gerador Termoelétrico)
Thot	Temperatura da junção quente (Terminal fonte quente)
Tcold	Temperatura da junção fria (Terminal fonte fria)
ΔT	Diferença de temperatura (Thot - Tcold)
α	Coeficiente de Seebeck
μ	Coeficiente de Thomson
Qh	Taxa de fluxo de calor absorvido
RL	Resistência de carga
Ra	Resistência de contato elétrico
FP	Fator de potência (Power Factor)
ZT	Figura de mérito termoelétrico
ZTavg	Figura de mérito médio
Bi ₂ Te ₃	Telureto de Bismuto
PCM	Phase Change Material (Material de Mudança de Fase)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
IEA	International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
PV	Polyvinyl (Policloreto de Vinila, Filme PVC)
DC	Direct Current (Corrente Contínua)
AC	Alternating Current (Corrente Alternada)
W	Watt
mW	MilliWatt (miliwatt)
°C	Graus Celsius
V	Volt

m^2	Metro quadrado
$\mu\Omega \cdot cm^2$	Micro-ohm-centímetro quadrado
S/m	Siemens por metro (unidade de condutividade elétrica)
W/(m·K)	Watt por metro kelvin (unidade de condutividade térmica)

SUMÁRIO

SUMÁRIO	15
1. INTRODUÇÃO	17
Objetivos	19
Objetivo Geral	19
Objetivos específicos	19
Justificativa e relevância	20
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1. Efeitos termoelétricos e processos termodinâmicos	21
2.1.1. Efeito Seebeck:	22
2.1.1.1. Coeficiente de Seebeck:	22
2.1.2. Efeito Thomson:	23
2.1.3. Efeito Peltier:	24
2.2 TEGs - Gerador de energia termoelétrica	25
2.3. Estrutura e modelo TEG	27
2.4 Equações para Termogeradores (TEG)	30
2.5 Tipos de fontes	30
2.6 TEG para faixa de temperatura baixa (<250 °C)	31
2.7 Eficiência dos TEGS	31
2.8 TEG solar	34
2.9 Coletor solar	34
2.10 Resfriamento dos TEGS	34
3. Metodologia	36
3.1 Materiais	36
3.1.1 Projeto do sistema.	36
3.1.2 TEG	37
3.1.3 Sistemas de Resfriamento	37
3.1.3.1 Aleta de Aquecimento: Responsável por absorver o calor gerado pelo efeito estufa.	38
3.1.3.2 Aleta de Resfriamento: Submersa em água para maximizar a dissipação de calor.	38
3.1.4 Caixa de Poliestireno	39
3.1.5 Fixação e Isolamento	39
3.1.6 Controle de Temperatura	41
3.1.7 Proteção Contra Perdas de Calor	42
3.1.8 Instrumentação	44
3.1.8.1 Controle de Temperatura (Leitura do termopar tipo K): Multímetro Icel Manaus MD-6490.	45
3.1.8.2 Controle de Tensão e Corrente (Leitura do TEG): Multímetro FoxLux FX-MD.	45
3.1.8.3 Análise de Dados: Utilização do software Excel para registrar, organizar	

os valores obtidos e gerar gráficos de resultados.	45
3.2 Métodos	45
3.2.1 Experimento 1 - Sem Resfriamento Submerso	45
3.2.1.1 – Isolado com filme PVC.	45
3.2.1.2 - Isolado com filme PVC e vidro.	46
3.2.2 Experimento 2 – Com filme PVC e vidro (Com Resfriamento Submerso)	48
4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS	49
4.1 Apresentação da pesquisa	49
4.1 Experimento 1 - Sem Resfriamento Submerso	49
4.1.1.1 – Isolado com filme PVC	51
4.1.1.2 – Isolado com filme PVC e vidro	53
4.1.1.3 – Comparação dos resultados do experimento Isolado com Papel Filme x Isolado com filme PVC e vidro	55
4.1.1.4 Experimento 3– Com filme PVC e vidro (Com Resfriamento Submerso)	57
4.1.1.5 – Comparação dos resultados do experimento Isolado com filme PVC e Vidro (sem resfriamento submerso na água) x experimento Isolado com filme PVC e Vidro (com resfriamento submerso na água).	59
4.2 Análise dos resultados	62
4.2.1 Experimento 1 - Sem Resfriamento Submerso	62
4.2.1.1 – Isolado com filme PVC	63
4.2.1.2 – Isolado com filme PVC e Vidro	63
4.2.1.3 Comparação dos resultados do experimento Isolado com filme PVC x Isolado com filme PVC e vidro	63
4.2.2 Experimento 2 - Com Resfriamento Submerso	63
4.3 Comparação geral dos experimentos	64
4.4 Considerações complementares sobre desempenho, limitações e aplicabilidade.	
4.5 Viabilidade Economica	65
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
ANEXOS	69
REFERÊNCIAS	70

1. INTRODUÇÃO

A relevância deste estudo reside na potencial contribuição para o desenvolvimento de tecnologias energéticas mais sustentáveis e eficientes, alinhando-se com as tendências globais de inovação e sustentabilidade na engenharia de energia.

O acesso à energia elétrica ainda representa um grande desafio em muitas regiões remotas ao redor do mundo. Segundo a Agência Internacional de Energia, aproximadamente 770 milhões de pessoas permanecem sem acesso à eletricidade, sendo a maioria residente em áreas rurais ou de difícil acesso (International Energy Agency AGENCY, 2022). No Brasil, dados da Agência Nacional de Energia Elétrica indicam que cerca de 500 mil pessoas vivem em comunidades isoladas da rede elétrica convencional, especialmente na região Norte, o que impõe barreiras logísticas, altos custos de infraestrutura e dificuldades de manutenção que dificultam a expansão da rede elétrica (Aneel, 2021).

Entre as soluções tradicionalmente adotadas nessas regiões, destacam-se os geradores a diesel e os sistemas fotovoltaicos. Apesar da popularidade dos geradores a combustão, seu uso contínuo implica altos custos operacionais, dependência de combustíveis fósseis e significativos impactos ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa (Moura; Oliveira; Corrêa, 2020). Já os sistemas fotovoltaicos, embora sustentáveis e eficientes em muitos contextos, enfrentam limitações relacionadas à intermitência da radiação solar, à necessidade de armazenamento em baterias e aos elevados custos iniciais de implantação e manutenção (Silva; Lima, 2021).

Diante dessas limitações, os geradores termoelétricos (TEGs – *Thermoelectric Generators*) surgem como uma alternativa complementar e promissora para aplicações *off-grid*. Baseados no efeito Seebeck, esses dispositivos convertem diretamente diferenças de temperatura em eletricidade, dispensando partes móveis, operando de forma silenciosa e com baixa manutenção, o que os torna ideais para ambientes remotos e hostis (LI et al., 2021). Embora apresentem eficiência energética inferior a outras fontes, sua robustez e simplicidade justificam o crescente interesse em seu uso em sistemas energéticos híbridos.

A proposta de integração dos TEGs com coletores solares e sistemas de resfriamento submerso visa intensificar o gradiente térmico necessário para seu funcionamento. Ao utilizar a radiação solar como fonte de calor e a água de rios, lagos

ou reservatórios como meio de resfriamento natural, é possível estabelecer uma diferença significativa de temperatura entre as faces do módulo termoeletrico, potencializando sua capacidade de geração (Zhang; Fang; Liu, 2023). Essa abordagem apresenta grande potencial para aplicação em sistemas isolados, explorando recursos naturais locais com tecnologias de baixo custo e fácil implementação.

Diante desse cenário, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema termoeletrico experimental que integra aquecimento solar e resfriamento submerso com o uso do TEG, visando explorar a diferença de temperatura como fonte para geração de energia elétrica em sistemas isolados. A proposta busca avaliar o desempenho térmico e elétrico do sistema em diferentes configurações físicas, com foco na simplicidade construtiva e viabilidade de aplicação em locais sem acesso à rede elétrica convencional. A abordagem adotada combina princípios de engenharia térmica e energética, com ênfase em soluções de baixo custo, sustentáveis e de fácil replicação. Além disso, este trabalho foi também motivado pelo interesse em dar continuidade à linha de pesquisa desenvolvida por Matheus H. Baesso (Baesso, 2021), cujo Trabalho de Conclusão de Curso intitulado *Sistema Autocompensador de Temperatura para Fonte Fotovoltaica* utilizou módulos Peltier para o resfriamento de painéis solares, visando aumentar sua eficiência. Inspirado nessa aplicação, o presente estudo busca aprofundar o conhecimento sobre o uso das placas Peltier, direcionando-as agora para a geração termoeletrica em sistemas isolados, ampliando as possibilidades de aplicação prática dessa tecnologia.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Desenvolver um sistema isolado de geração de eletricidade utilizando o efeito Peltier-Seebeck. Para maximizar a diferença de temperatura e aumentar a eficiência da geração termoelétrica, esse sistema é um conjunto composto de duas partes: um forno solar para aquecimento e uma estrutura flutuante de resfriamento em água.

Objetivos específicos

- Projetar e construir uma estrutura que permita a integração eficiente do gerador termoelétrico ao sistema de aquecimento solar e resfriamento submerso.
- Aprimorar e aperfeiçoar um sistema de aquecimento utilizando modelagem derivada de sistema termossolar para maximizar a temperatura obtida.
- Realizar experimentos para obter curvas de desempenho relacionando temperatura e potência gerada pelo TEG em diferentes condições de radiação solar.
- Comparar os resultados obtidos entre diferentes estruturas físicas testadas, a fim de identificar quais configurações geram maior potência e maior diferença de temperatura entre as faces do gerador termoelétrico.

Justificativa e relevância

A crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis e acessíveis em áreas remotas tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias alternativas de geração elétrica. Dentre essas, os geradores termoelétricos (TEGs) se destacam por sua capacidade de converter calor diretamente em eletricidade, operando de forma silenciosa, sem partes móveis e com baixa necessidade de manutenção.

Este trabalho parte da premissa de que a eficiência desses dispositivos pode ser significativamente ampliada ao se explorar ambientes com fontes de calor e de dissipação natural, como a combinação entre radiação solar e água de rios, lagos ou reservatórios. Nesse contexto, propõe-se o estudo de um sistema termoelétrico que integra aquecimento por forno solar e resfriamento submerso, visando maximizar o gradiente de temperatura e, conseqüentemente, a geração de energia.

A relevância da pesquisa está na possibilidade de aplicar essa tecnologia em contextos reais de isolamento elétrico, como propriedades rurais, zonas ribeirinhas e regiões de difícil acesso. Além disso, o baixo custo dos materiais utilizados e a simplicidade da montagem tornam o sistema uma alternativa viável para soluções energéticas descentralizadas, com potencial para alimentar sensores, atuadores de emergência e pequenos dispositivos em ambientes sem infraestrutura elétrica.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que embasam o desenvolvimento do sistema termoelétrico proposto. Inicialmente, são abordados os efeitos termoelétricos e os processos termodinâmicos envolvidos (2.1), com destaque para os efeitos Seebeck, Thomson e Peltier. Em seguida, são discutidos os princípios de funcionamento dos geradores termoelétricos (TEGs) (2.2), sua estrutura básica e modelo operacional (2.3), bem como as principais equações que regem seu desempenho (2.4).

O capítulo também explora os diferentes tipos de fontes térmicas aplicáveis aos TEGs (2.5), com ênfase nos dispositivos que operam na faixa de baixa temperatura (2.6). A eficiência dos TEGs e os fatores que a influenciam são detalhados na seção 2.7. Na sequência, discute-se o conceito de TEG solar (2.8), seguido pela descrição do funcionamento e características dos coletores solares utilizados no sistema (2.9). Por fim, o capítulo encerra com uma análise das estratégias de resfriamento dos TEGs (2.10), elemento fundamental para o aumento do gradiente térmico e, portanto, da eficiência do dispositivo.

2.1. Efeitos termoelétricos e processos termodinâmicos

Os TEGs são sistemas que operam a partir de efeitos termoelétricos para converter calor em energia elétrica. Esses efeitos estão diretamente relacionados aos princípios da termodinâmica, que descrevem os processos de transferência de energia e suas limitações. Nesse contexto, Enescu (2019a) explica os fundamentos termodinâmicos associados aos processos irreversíveis e reversíveis que ocorrem nesses dispositivos:

Os efeitos termoelétricos que ocorrem em dispositivos TEG estão sujeitos às leis termodinâmicas. De acordo com a termodinâmica, a transferência de calor através de uma diferença finita de temperatura é um processo irreversível e a variação de entropia desse processo é positiva. A condução de calor e o aquecimento Joule são considerados processos irreversíveis. O calor é produzido irreversivelmente de acordo com o efeito Joule quando uma corrente elétrica flui através de um condutor ou semicondutor. O efeito Joule ocorre nas interligações TEG devido à sua resistência de contato elétrico ou em um termopar. Outras irreversibilidades são encontradas na transferência de calor entre o TEG e o ambiente local. Se os processos irreversíveis forem removidos, a entropia torna-se nula. Neste caso, as condições ideais dadas pela eficiência de Carnot ou COP (coeficiente de desempenho) são alcançadas. Os efeitos Seebeck, Thomson e Peltier são processos termodinâmicos reversíveis. Quando a corrente flui através de um condutor, tanto o efeito Joule quanto o efeito Thomson ocorrem simultaneamente, e a magnitude do efeito

Thomson é cerca de duas vezes menor que a magnitude do efeito Joule (ENESCU, 2019, on-line).

De forma resumida, TEGs operam a partir de processos complexos que envolvem tanto fenômenos irreversíveis, quanto processos reversíveis. A compreensão dessas dinâmicas, por meio das leis da termodinâmica, é essencial para otimizar o desempenho, reduzindo perdas associadas às irreversibilidades e aproximando suas condições operacionais da eficiência ideal preconizada pelo ciclo de Carnot.

2.1.1. Efeito Seebeck:

Segundo Jouhara et al., 2021, o efeito termoelétrico ou efeito Seebeck define um mecanismo no qual uma diferença de temperatura produz uma diferença de potencial, gerando energia. Acredita-se que tenha sido definido pela primeira vez na década de 1820, pelo físico alemão Thomas Johann Seebeck, algumas evidências mostram também que Alessandro Volta, 27 anos antes, também havia observado o efeito Seebeck.

2.1.1.1. Coeficiente de Seebeck:

Segundo Jouhara et al., 2021 o efeito Seebeck explica a formação de um diferencial de potencial (ΔV) através de um semicondutor (ou condutor) devido à difusão de seus portadores de carga ao longo de um gradiente de temperatura ($\Delta T = T_{hot} - T_{cold}$).

Este fenômeno ocorre no material (seja ele um semicondutor ou condutor) quando um de seus lados é aquecido ou resfriado. As cargas migram da borda quente para a borda fria, contribuindo para uma variação na quantidade de portadores de carga, um efeito que é compensado pelo campo elétrico interno resultante. A forma do portador de carga majoritária determinará o sinal da diferença de potencial que, por definição, é identificado pelo potencial do lado frio em relação ao lado quente. O sinal do coeficiente de Seebeck indica se o material é um condutor do tipo p ou n, sendo que o sinal positivo indica o tipo p, e o negativo indica o material tipo n. O coeficiente de Seebeck (α_{AB}), que é responsável por permitir o movimento da corrente enquanto o gradiente de temperatura está presente, é a relação entre o diferencial teórico criado e o gradiente de temperatura aplicado, conforme pode ser visto na Eq. (1) (Jouhara et al., 2021).

Equação 1 - Coeficiente de Seebeck

$$\alpha_{AB} = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1)$$

Fonte: Jouhara et al., 2021

O gradiente de temperatura (ΔT) deve ser produzido entre os dois lados da amostra e a tensão resultante (ΔV) deve ser medida conectando eletricamente esses dois pontos (lados).

O coeficiente de Seebeck de um material termoelétrico depende da temperatura, bem como de outras duas propriedades físicas de transporte (condutividade térmica, condutividade elétrica). Além disso, o sinal do coeficiente de Seebeck depende do tipo de portadores (elétrons e^- e vacâncias h^+) que conduzem a corrente elétrica. Se a corrente elétrica for conduzida por e^- , o sinal do coeficiente de Seebeck é negativo. Se a corrente elétrica for conduzida por h^+ , o sinal do coeficiente de Seebeck é positivo. O coeficiente de Seebeck α_{AB} , o gradiente de temperatura ∇T e o campo elétrico E são escritos na seguinte relação (Enescu, 2019a).

Equação 2- Coeficiente de Seebeck em relação ao campo elétrico.

$$\alpha_{AB} = \frac{E}{\nabla T} \quad (2)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

2.1.2. Efeito Thomson:

O efeito Thomson afirma que, em qualquer material condutor no qual a corrente elétrica flui na presença de uma diferença de temperatura entre duas extremidades, o calor também é liberado ou absorvido. O calor do efeito Thomson liberado ou absorvido é dado por:

Equação 3 - Calor do efeito Thomson

$$\dot{Q} = \underbrace{\rho \cdot J^2}_{\text{Joule heating}} - \underbrace{\mu_{AB} \cdot J \cdot \nabla T}_{\text{Thomson heating}} \quad (3)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

Onde $\rho = \frac{1}{\sigma}$ é a resistividade elétrica em $[\Omega \cdot m]$, σ é a condutividade elétrica em $[S \cdot m^{-1}]$, J é a densidade de corrente em $[A \cdot m^{-2}]$, μ_{AB} é o coeficiente de Thomson em $[V \cdot K^{-1}]$, e $\nabla T = \frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura ao longo do condutor em $[K]$.

O aquecimento de Joule ocorre quando uma corrente elétrica que flui através de um condutor produz calor. O aquecimento de Joule não muda seu sinal na Eq. (3), enquanto o aquecimento de Thomson (o segundo termo) muda seu sinal, seguindo J .

Portanto, a convenção de sinal do coeficiente de Thomson é considerada da seguinte forma :

- Positivo quando a corrente flui do lado de baixa temperatura para o lado de alta temperatura do condutor e o calor é absorvido através dele;
- Negativo quando a corrente flui inversamente e o calor é rejeitado pelo condutor;
- Nulo quando a corrente flui do lado de alta para o lado de baixa temperatura e vice-versa, e o calor não é gerado nem absorvido.

As seguintes relações mantêm-se entre o coeficiente de Seebeck e o coeficiente de Peltier, bem como entre o coeficiente de Seebeck e o coeficiente de Thomson. Estas são chamadas de relações de Thomson (Enescu, 2019a).

Equação 4 - Coeficiente de Seebeck

$$\alpha_{AB} = \sigma_{AB} * T \quad (4)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

Equação 5 - Coeficiente de Thomson

$$\mu_{AB} = T * \frac{d\sigma_{AB}}{dT} \quad (5)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

2.1.3. Efeito Peltier:

A corrente elétrica que atravessa a junção dos dois materiais produz ou absorve calor por unidade de tempo na junção para compensar a diferença na capacidade de estrutura química dos dois materiais. Graças a essa influência, pode-se produzir um refrigerador eletrônico, conhecido como cooler de Peltier (Jouhara et al., 2021).

O efeito Peltier ocorre porque a energia média dos elétrons envolvidos na transmissão da corrente elétrica nos vários condutores é diferente. Numerosas considerações, como a faixa de energia dos elétrons, sua distribuição no condutor e os átomos que os dispersam sob o efeito da tensão aplicada na junção de dois condutores dissimilares, terão efeito no condutor. Os elétrons se movem de um eletrodo para outro com base no caminho da onda de carga elétrica, então passam sua energia extra para os átomos circundantes (exsudam) ou consomem energia dos átomos circundantes (Jouhara et al., 2021).

Este efeito possui eficiência muito baixa, outro fator é que a própria corrente circulante continua a produzir quantidades significativas de calor, em grandes aplicações, geram um valor elevado de dissipação de calor. Caso os componentes Peltier fiquem muito frios, poderá ocorrer um curto-circuito devido à condensação (Jouhara et al., 2021).

O principal benefício do efeito Peltier é que ele permite o desenvolvimento de dispositivos de resfriamento e aquecimento que não envolvem peças móveis; assim, tais dispositivos são muito menos propensos a mau funcionamento em relação aos refrigeradores e aquecedores tradicionais e, portanto, não necessitam de manutenção (Jouhara et al., 2021).

Os dispositivos Peltier não geram som durante a operação e podem, teoricamente, atingir temperaturas tão baixas quanto -80°C . Normalmente, o efeito Peltier é usado de forma produtiva em nível microscópico, onde as técnicas tradicionais de resfriamento não funcionam (Jouhara et al., 2021).

2.2 TEGs - Gerador de energia termoelétrica

Os TEGs convertem calor diretamente em eletricidade sem a necessidade de componentes móveis, o que os torna ideais para geração de energia em pequena escala. Um TEG consiste essencialmente em um grande número de termoelementos tipo **P** e tipo **N**, conectados alternadamente eletricamente em série e termicamente em paralelo. Uma diferença de temperatura entre as extremidades quente e fria do TEG produz uma tensão via efeito Seebeck. O calor residual de diferentes fontes pode ser fornecido ao lado quente do TEG, que é escoado a uma temperatura mais baixa pelo lado frio (ou dissipador de calor) do dispositivo. Assim, a eletricidade produzida pelo TEG a partir do calor residual pode ser econômica se o seu custo de produção for reduzido (Aswal; Basu; Singh, 2016).

2.3. Estrutura e modelo TEG

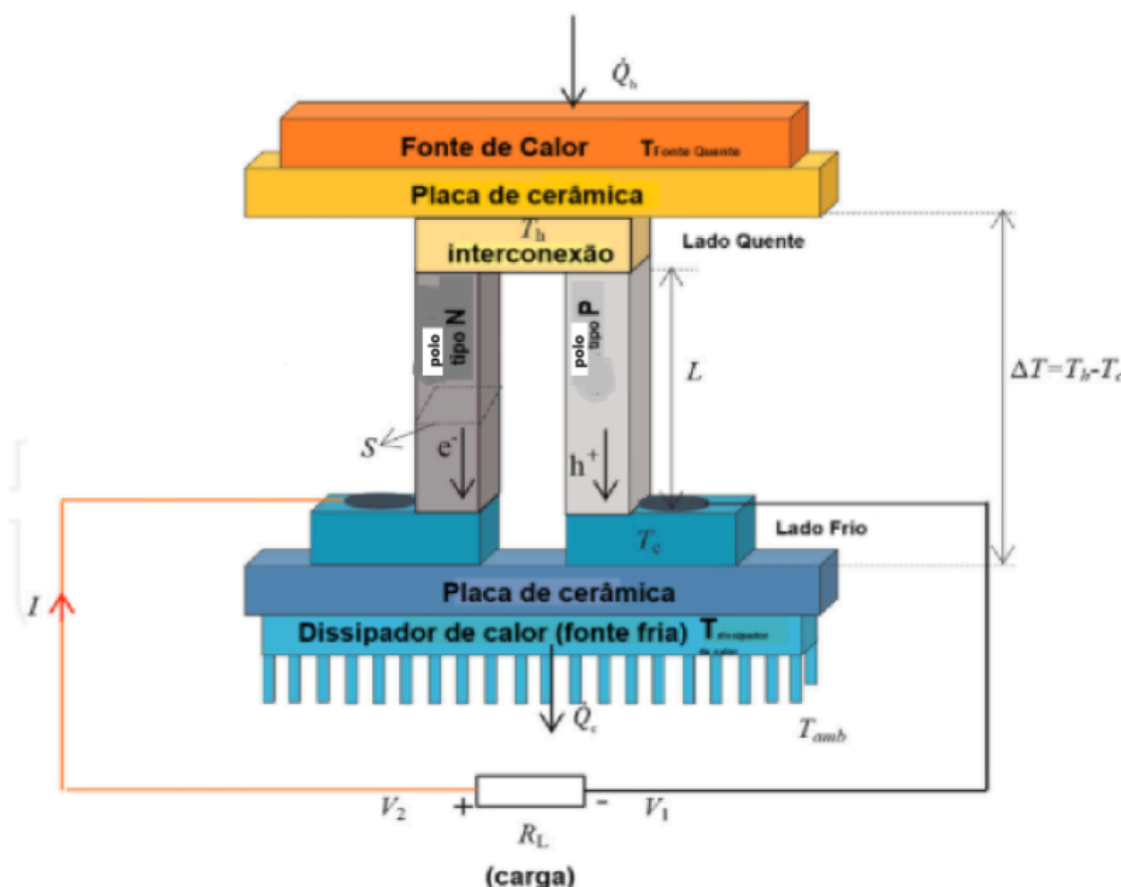
O dispositivo TEG é composto por um ou mais pares termoelétricos. O TEG mais simples consiste em um termopar, compreendendo um par de termoelementos ou polos tipo **P** e tipo **N**, conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo.

A diferenciação entre materiais dopados com **N** e **P** é importante. O pólo tipo **P** possui coeficiente de Seebeck positivo e excesso de buracos [h^+]. O polo do tipo **N** tem um coeficiente de Seebeck negativo e um excesso de elétrons livres [e^-]. Os dois pólos são ligados entre si de um lado por um condutor elétrico formando uma junção ou interligação, geralmente sendo uma tira de cobre. Vamos denotar a tensão no terminal

externo conectado ao pólo tipo N no lado frio do TEG como V_2 , enquanto a tensão no terminal externo conectado ao pólo tipo P no lado frio do TEG é V_1 (Figura 1).

Uma carga elétrica com resistência R_L é conectado em série com os terminais de saída do TEG criando um circuito elétrico. Quando a corrente elétrica flui nesta carga elétrica, uma tensão elétrica é gerada em seus terminais. O dispositivo TEG irá gerar eletricidade DC (corrente contínua) desde que haja uma gradiente de temperatura entre os seus lados. Quando a diferença de temperatura $\Delta T = T_{hot} - T_{cold}$ através do dispositivo TEG aumenta, mais potência elétrica de saída será gerada (Enescu, 2019a).

Figura 1- Esquema de um dispositivo TEG com um único par termoeletrico e dois pólos.



Fonte: (Enescu, 2019a)

2.4 Equações para Termogeradores (TEG)

A resistência interna equivalente dos pares termoeletricos em série é dada por:

Equação 6 - Resistência interna equivalente.

$$R = n * [\rho_P * L_P * (S_P)^{-1} + \rho_N * L_N * (S_N)^{-1}] \quad (6)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

A condutância térmica equivalente dos pares termoelétricos em paralelo é:

Equação 7 - Condutância térmica equivalente.

$$K = n * [k_P * S_P * (L_P)^{-1} + k_N * S_N * (L_N)^{-1}] \quad (7)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

Onde $\rho = R * \frac{S}{L}$ é a resistividade elétrica de cada pólo, se a área da seção transversal de cada pólo em [m²], L é o comprimento da pólo em [m], k é a condutividade térmica de cada pólo em [W·(m·K)⁻¹] e a condutância térmica de cada pólo é $K = k * \frac{S}{L}$ [W·K⁻¹].

Essas relações são ainda mais simplificadas considerando que os pólos do tipo N e do tipo P são iguais em forma ($L = L_P = L_N$ e $S = S_p = S_n$) e propriedades do material ($\rho = \rho_P = \rho_N$ e $k = k_P = k_N$). A resistência interna equivalente torna-se:

Equação 8 - Resistência térmica equivalente

$$R = (n * 2\rho * L * (S)^{-1}) \quad (8)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

E a condutância térmica equivalente é:

Equação 9 - Condutância térmica equivalente.

$$K = (n * 2k * S * (L)^{-1}) \quad (9)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

Se a resistência de contato elétrico R_a não é desprezível, a resistência interna equivalente dos pares termoelétricos em série torna-se:

Equação 10 - Resistência interna equivalente.

$$R = n * 2\rho * L * (S)^{-1} + R_a \quad (10)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

A tensão nos terminais TEG é:

Equação 11 - Tensão nos terminais.

$$V_{TEG} = V_2 - V_1 = n * (I * R * \alpha_{PN} * \Delta T) = n * I * R - V_{seebeck} \quad (11)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

Onde $\alpha_{PN}=(\alpha_P-\alpha_N)^2$ é o coeficiente de Seebeck do par termoelétrico. A corrente elétrica de entrada no circuito é:

Equação 12 - Corrente elétrica de entrada no circuito.

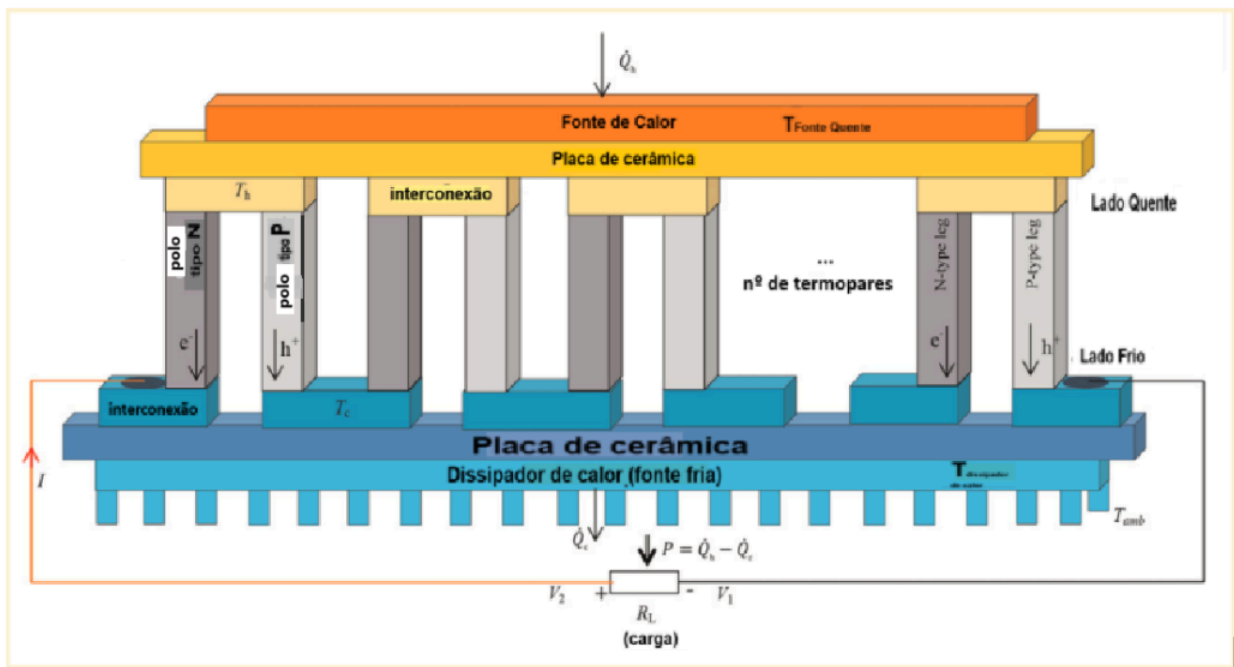
$$I = \frac{V_{seebeck}}{n^*(R+RL)} = \frac{n^*\alpha_{PN}\Delta T}{n^*(R+RL)} \quad (12)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

Onde a resistência da carga R_L está conectada à saída do circuito onde é consumida a potência elétrica de saída gerada pelo TEG; a tensão de Seebeck é $V_{seebeck}=V_p-V_n=\alpha_{PN}\Delta T$. A relação entre $V_{seebeck}$ e ΔT não é linear, portanto, α_{PN} depende da temperatura.

A Figura 2, representa um dispositivo TEG com diversos pares termoelétricos.

Figura 2- Esquema de um dispositivo TEG com n pares termoelétricos.



Fonte: (Enescu, 2019a)

A potência elétrica de saída entregue pelo TEG à carga é:

Equação 13 - Potência elétrica de saída entregue pelo TEG.

$$P = n^*(\alpha_{PN} * I * \Delta T - R * I^2) \quad (13)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

Por outro lado, a potência elétrica de saída absorvida pela carga (considerando o sinal convencional, com a corrente fluindo conforme indicado na Figura 5) é:

Equação 14 - Potência elétrica de saída absorvida pela carga.

$$P = -V_{\text{TEG}} * I = n * (R * I^2 - \alpha_{\text{PN}} * I * \Delta T) \quad (14)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

A potência de saída elétrica absorvida pela resistência da carga R_L é:

Equação 15 - Potência elétrica de saída absorvida pela resistência.

$$P_R = I^2 * R_L = \left(\frac{n * \alpha_{\text{PN}} * \Delta T}{n * (R + R_L)} \right)^2 * R_L \quad (15)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

A potência elétrica máxima de saída de um TEG é obtida quando a potência elétrica de saída é maximizada em relação à corrente elétrica:

Equação 16 - Potência elétrica máxima de saída de um TEG.

$$P_{\text{MÁX}} = n * \left(\frac{(\alpha_{\text{PN}} * \Delta T)^2}{4R} \right) \quad (16)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

Equação 17 - Corrente Máxima.

$$I_{\text{MÁX}} = \frac{(\alpha_{\text{PN}} * \Delta T)}{2R} \quad (17)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

A potência elétrica máxima de saída fornecida pelo TEG é obtida se a resistência da carga for igual à resistência interna equivalente dos pares termoelétricos em série.

A taxa de fluxo de calor absorvido na junção quente do TEG depende do calor Peltier, da condução de calor e do calor Joule. A taxa de fluxo de calor absorvido na junção quente depende das propriedades do material termoelétrico e da geometria dos pólos:

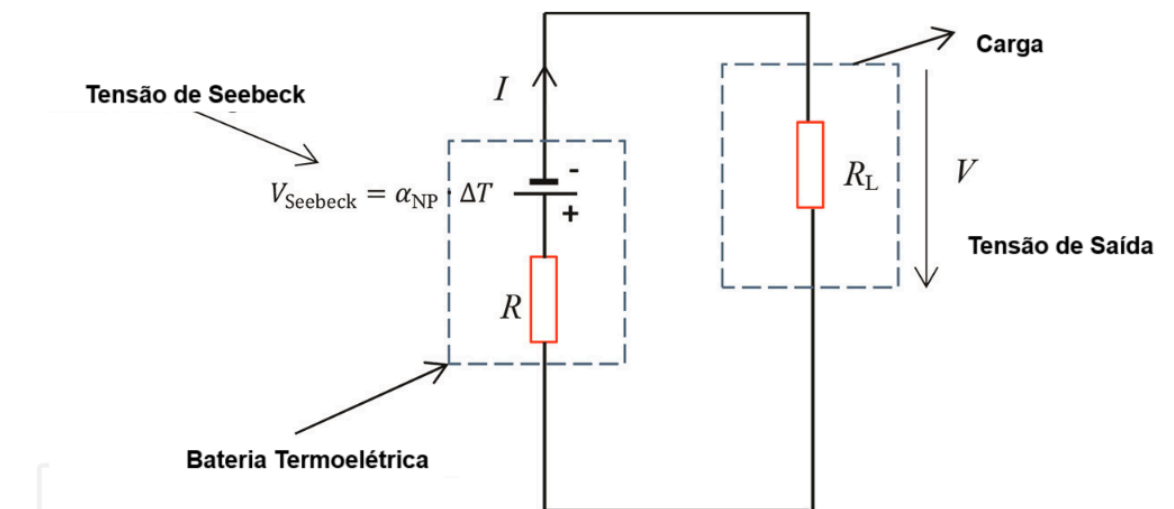
Equação 18 - Taxa de fluxo de calor absorvido.

$$\dot{Q}_h = n * \left[\alpha_{\text{PN}} * T_H * I - \frac{R * I^2}{2} + k * \Delta T \right] \quad (18)$$

Fonte: (Enescu, 2019a)

Um TEG poderia ser considerado uma bateria térmica, uma estrutura física utilizada para armazenar e liberar energia térmica. A força eletromotriz da bateria térmica é a tensão de Seebeck (Figura 3).

Figura 3 - Circuito equivalente de um dispositivo TEG.



Fonte: (Enescu, 2019a)

2.5 Tipos de fontes

Várias fontes que geram calor residual dependendo da temperatura gerada por elas podem ser amplamente classificadas nas seguintes categorias:

- Fonte de baixa temperatura (<250 °C): as principais fontes nesta faixa de temperatura incluem condensador de ar condicionado/refrigeração, fornos, compressores de ar, portas de fornos, circuitos eletrônicos, etc.
- Fonte de temperatura média (~250–650°C): as fontes para esta temperatura incluem exaustão de caldeira a vapor, exaustão de turbina a gás, fornos de secagem e cozimento, exaustão automotiva, etc.
- Fonte de alta temperatura (> 650° C): as fontes para esta região de temperatura incluem fornos de refino de metal, fornos de aquecimento de aço, usinas de hidrogênio, etc. A decomposição natural dos radioisótopos (como Pu 238) também produz calor de alta temperatura (~800–1000 °C) e TEG que utilizam fontes de calor são denominados geradores de energia termoelétrica de radioisótopos (RTG) (Aswal; Basu; Singh, 2016).

2.6 TEG para faixa de temperatura baixa (<250 °C)

Os teluretos e selenetos de bismuto, especialmente o Bi_2Te_3 , destacam-se por apresentar elevados valores de figura de mérito (ZT) na faixa de baixas temperaturas (100–250 °C), sendo amplamente empregados na fabricação de geradores termoelétricos (TEGs). Em dispositivos baseados em Bi_2Te_3 , interconexões metálicas, geralmente em cobre (Cu) ou prata (Ag), são utilizadas para conectar os termoelementos. Habitualmente, aplica-se uma camada de níquel galvanizado, com espessura aproximada de 1 μm , nas extremidades dos termoelementos, possibilitando a união com as fitas metálicas por soldagem (Aswal; Basu; Singh, 2016).

Avanços recentes demonstraram que o uso de uma camada orgânica automontada de 3-mercaptopropiltrimetoxissilano nos termoelementos de Bi_2Te_3 promove ligações covalentes eficientes entre a camada de níquel e as extremidades dos termoelementos, reduzindo a resistência de contato (ρ_c) para cerca de 1 $\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$, tanto em elementos tipo p quanto tipo n (LEE et al., 2020).

A prensagem a quente a vácuo de pó de níquel nas extremidades dos termoelementos tipo p de Bi_2Te_3 também resulta em baixo ρ_c . Contudo, nos termoelementos tipo n, ocorre um aumento significativo da resistência de contato (~210 $\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$), devido a reações químicas indesejáveis. Para contornar esse problema, foi introduzida uma camada espessa de $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$ dopada com 1% de SbI_3 entre o níquel e o $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$ tipo n, proporcionando contatos mecanicamente estáveis e resistência de contato inferior a 1 $\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ (Lee et al., 2020; Zhao et al., 2022).

Além dos teluretos e selenetos de bismuto, têm sido explorados recentemente materiais termoelétricos alternativos, como ligas baseadas em $\text{MgAg}_{0,965}\text{Ni}_{0,005}\text{Sb}_{0,99}$, com relatos de eficiência de até 8,5% em TEGs de baixa temperatura (Zhao et al., 2022). Paralelamente, há esforços para o desenvolvimento de TEGs baseados em materiais orgânicos. Entretanto, estes apresentam alta resistividade elétrica, limitando significativamente a densidade de corrente extraída dos dispositivos, o que constitui um obstáculo relevante para aplicações práticas (LI et al., 2023).

2.7 Eficiência dos TEGS

O desenvolvimento de TEGs com alta eficiência depende de diversos fatores, como a disponibilidade de materiais termoelétricos tipo n e tipo p com elevado valor de figura de mérito (ZT), a formação de contatos ôhmicos de baixa resistência entre termoelementos e interconexões metálicas, bem como a gestão eficiente da transferência de calor através do dispositivo (Aswal; Basu; Singh, 2016; LI et al., 2023).

A eficiência de um TEG está diretamente relacionada ao valor médio do ZT, dado pela Equação 19:

$$\overline{ZT} = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma \cdot T}{\kappa} \quad (19)$$

Fonte: (Aswal; Basu; Singh, 2016)

Onde:

- α é o coeficiente de Seebeck (V/K);
- σ é a condutividade elétrica (S/m);
- κ é a condutividade térmica (W/m·K);
- T é a temperatura média de operação (K).

Para alcançar alta eficiência, é fundamental utilizar materiais com elevado valor médio de ZT, caracterizados por elevado α (para gerar alta tensão), elevada σ (para reduzir perdas por efeito Joule) e baixa κ (para maximizar o gradiente de temperatura) (Aswal; Basu; Singh, 2016; LI et al., 2023).

Segundo (Nozariasbmarz *et al.*, 2020) a eficiência de conversão teórica (η_{\max}) de TEGs é expresso pela (Equação 20):

Equação 20 - Eficiência de conversão teórica.

$$\eta_{\max} = \left(\frac{T_H - T_C}{T_H} \right) \frac{\sqrt{1 + (zT)_{\text{avg}}} - 1}{\sqrt{1 + (zT)_{\text{avg}}} + \left(\frac{T_C}{T_H} \right)} \quad (20)$$

Fonte: (Nozariasbmarz *et al.*, 2020)

Onde T_c e T_h são temperaturas do lado frio e quente, respectivamente, e $(zT)_{\text{avg}}$ é a figura de mérito média dos materiais termoelétricos (TE). (zT) é um componente adimensional dependente de materiais que é definido pela Equação 3 :

Equação 21 - Figura de mérito.

(21)

$$zT = \frac{\sigma S^2}{\kappa} T$$

Fonte: (Nozariasbmarz *et al.*, 2020)

Onde σ , S , κ e T são condutividade elétrica, coeficiente de Seebeck, condutividade térmica total (incluindo condutividades térmicas eletrônicas [κ Eletrônica], rede [κ Malha] e bipolar [κ Bipolar]) e temperatura absoluta, respectivamente. O termo σS^2 é conhecido como fator de potência (FP). Sabe-se que um FP alto é um fator importante para aumentar a potência de saída de um TEG, no entanto, não é suficiente para melhorar a eficiência de conversão do TEG, que depende principalmente do zT .

Em geral, a eficiência de um TEG pode ser melhorada por (1) alta (zT) média de materiais TE (Equação 1), (2) grande gradiente de temperatura (Equação 1), (3) projeto TEG apropriado para minimizar a perda de calor e (4) pequenas resistências de contato elétricas e térmicas na junção de materiais TE e substrato controladas principalmente pela qualidade da metalização de contato dos materiais TE, processo de fabricação do dispositivo, material de solda/brasagem e eletrodos de interconexão.

Todos esses fatores devem ser considerados no projeto e fabricação de TEGs com alta eficiência. Este artigo aborda esses aspectos que vão desde materiais até módulos TE. Demonstramos bismuto do tipo p e n ligas de telureto (BiTe) com alta (zT) média levando a um desempenho eficiente do módulo para aplicação de recuperação de calor residual na faixa de temperatura de 25 a 250°C (Nozariasbmarz *et al.*, 2020).

Relatamos a síntese de materiais BiTe do tipo **P** e **N** e os utilizamos para demonstrar módulos TEG de alto desempenho para aplicação de recuperação de calor residual. Ambas as ligas BiTe do tipo **P** e **N** com alta média e pico zT foram sintetizadas através de uma combinação de engenharia de defeitos e ligas substitucionais. Foi alcançada uma eficiência de conversão recorde de 8% e densidade de potência de 2,1 W/cm² em módulos à base de liga BiTe. Os módulos TEG com ligas BiTe baseadas em zT de alta média apresentam eficiência 40% maior em comparação com os materiais cristalinos comerciais e eficiência 15% maior que os valores relatados na

literatura. Este estudo revela que zT médio alto e variáveis de design de módulo são fatores críticos para aumentar a eficiência dos TEGs (Nozariasbmarz *et al.*, 2020).

2.8 TEG solar

Uma das aplicações interessantes do TEG é na produção de energia elétrica a partir do calor gerado pela concentração da energia solar. O TEG Solar utiliza basicamente um coletor, TEG e um dissipador de calor. O fluxo solar incidente na extremidade quente do TEG pode ser variado com diversas opções de coletores disponíveis, como placa plana evacuada, calhas parabólicas, lentes Fesnel e discos parabólicos. Até agora, os sistemas solares TEG de última geração alcançaram eficiência de ~5% para uma diferença de temperatura de cerca de 100 °C com os materiais de $ZT \sim 1$ (Aswal; Basu; Singh, 2016).

Assim, a principal barreira comercial da tecnologia solar TEG foi a sua eficiência de conversão, que é muito inferior à de outras tecnologias de eletricidade solar, como as células solares, que apresentam uma eficiência de ~18%. Com a melhoria do ZT em vários materiais termoelétricos e o design aprimorado de coletores solares, são esperadas altas eficiências de conversão no futuro (Aswal; Basu; Singh, 2016).

2.9 Coletor solar

Em um coletor solar, a radiação solar recebida é convertida em energia térmica. O desempenho térmico geral depende muito do potencial de radiação solar da região. A radiação solar que incide sobre o vidro transparente da abertura é transmitida para a área do forno e é absorvida por uma superfície que geralmente é feita de materiais metálicos e pintada de preto fosco para maximizar a absorção solar. As propriedades do material, da cor e da superfície são de vital importância para a eficácia da absorção solar. Através dos mecanismos de transferência de calor por convecção natural, condução e radiação parcialmente térmica (Cuce; Kolayli; Cuce, 2020).

2.10 Resfriamento dos TEGS

Na maioria das vezes, a saída de energia produzida pelo TEG depende do gradiente de temperatura através dele. Quanto maior o gradiente de temperatura, maior a saída de energia produzida pelo TEG. Kiflemariam; Lin, 2016 apud Abu Bakar *et al.*, 2020 pesquisaram o mecanismo de auto-resfriamento para uma matriz de módulos TEG.

A energia gerada pelos TEGs é capaz de acionar um ventilador que reduz a temperatura do dispositivo em até 20%. Tu *et al.*, 2017, apud Abu Bakar *et al.*, 2020 exploraram o uso de material de mudança de fase (PCM) em TEG para aplicações de

exploração espacial. Sob uma ampla faixa de temperatura (de +100°C a -50°C), a pesquisa mostrou um aumento de 32,32% na saída total de energia ao usar composto de parafina/5% em peso de EG. El-Adl; Mousa; Hegazi, 2018 apud Abu Bakar *et al.*, 2020 investigaram técnicas de resfriamento passivo no desempenho do TEG.

3. METODOLOGIA

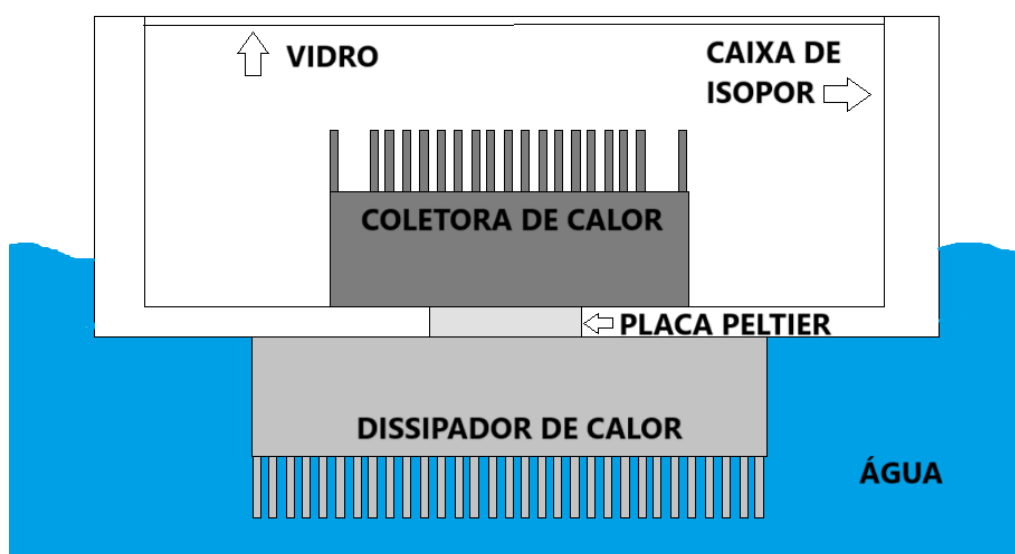
Este capítulo descreve os procedimentos adotados para o desenvolvimento experimental do sistema termoelétrico proposto. Inicia-se com a apresentação geral da metodologia aplicada (3.1), seguida pela descrição dos materiais e ferramentas utilizados na construção do sistema (3.2). A estrutura do sistema gerador é detalhada na seção 3.3, enquanto a montagem do sistema térmico e o conjunto flutuante são apresentados nos tópicos 3.4 e 3.5, respectivamente. Na sequência, são descritas as etapas de vedação e fixação da estrutura (3.6), bem como a metodologia de coleta de dados experimentais (3.7). A preparação para os ensaios (3.8), o funcionamento do sistema flutuante com e sem resfriamento (3.9), e os critérios de avaliação da performance termoelétrica (3.10) complementam a explicação da metodologia adotada. Por fim, o tópico 3.11 apresenta o conjunto de ferramentas e sensores utilizados para medição e controle dos parâmetros experimentais.

3.1 Materiais

3.1.1 Projeto do sistema.

Para construir uma estrutura que integre eficientemente o gerador termoelétrico ao sistema de aquecimento solar e resfriamento submerso, iniciamos o processo com o desenho do projeto do sistema, alinhado ao objetivo central do trabalho. Na Figura 4 é apresentado um croqui do equipamento desenvolvido neste trabalho.

Figura 4 - Projeto do sistema TEG.

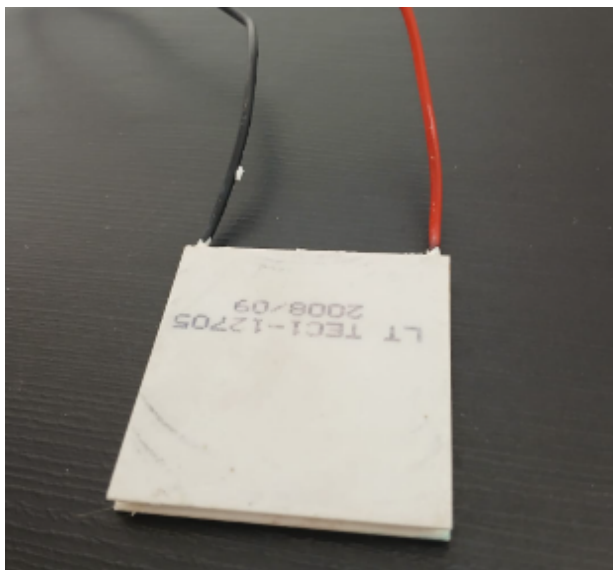


Fonte: (Autor, 2024)

3.1.2 TEG

Na Figura 5 demonstramos o TEG modelo LT TEC1-12705, escolhido por suas características técnicas adequadas à aplicação.

Figura 5 - TEG.



Fonte: (Autor, 2024)

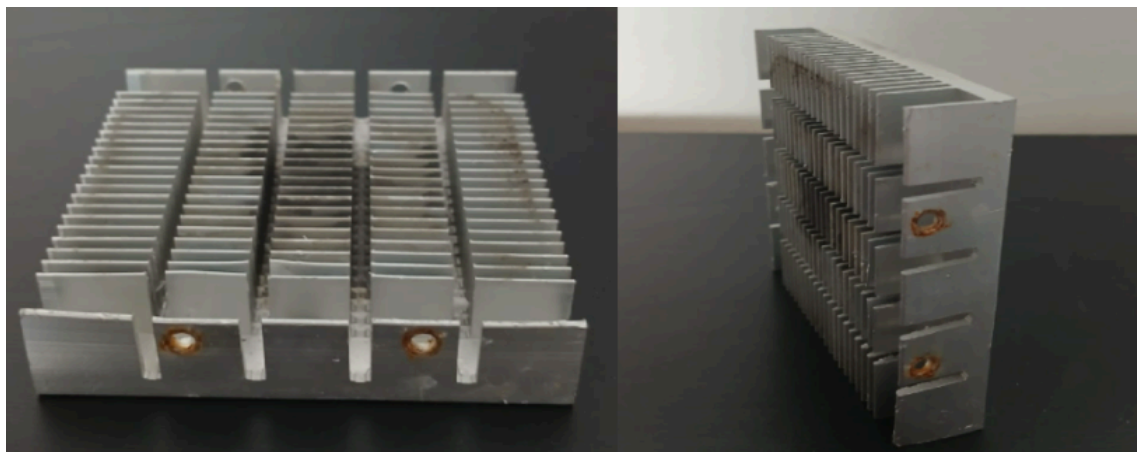
3.1.3 Sistemas de Resfriamento

Para aumentar a eficiência da troca de calor no TEG, empregamos aletas, dispositivos projetados para ampliar a área de contato entre o ambiente e a superfície de troca térmica. Isso possibilita uma transferência mais eficiente de calor, tanto na extremidade de aquecimento quanto na de resfriamento.

3.1.3.1 Aleta de Aquecimento: Responsável por absorver o calor gerado pelo efeito estufa.

A aleta de aquecimento tem como objetivo aumentar a área de contato da face do gerador termoelétrico, fazendo com que a diferença de temperatura entre as faces seja maior.

Figura 6 - Aleta de aquecimento.

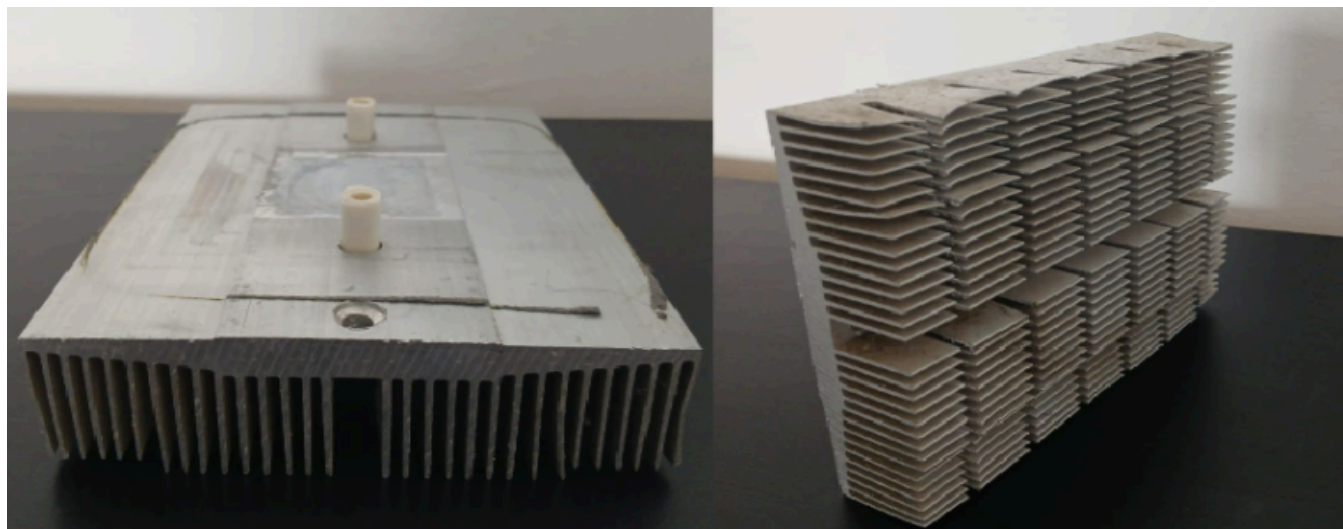


Fonte: (Autor, 2024)

3.1.3.2 Aleta de Resfriamento: Submersa em água para maximizar a dissipação de calor.

A aleta de resfriamento, submersa em água, amplia a área de troca térmica e favorece a dissipação do calor da face fria do TEG."

Figura 7 - Aleta de resfriamento.



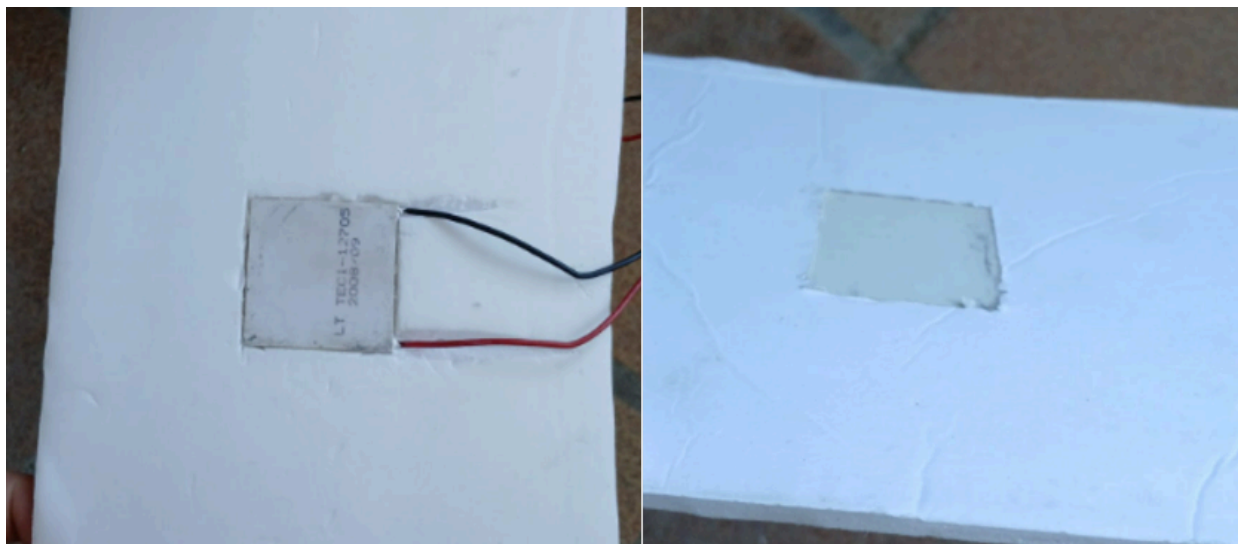
Fonte: (Autor, 2024)

3.1.4 Caixa de Poliestireno

Como a estrutura foi projetada para flutuar, utilizamos uma caixa de Poliestireno como base estrutural. A base original da caixa, de espessura 4 cm, foi cortada conforme as dimensões da aleta de resfriamento, e uma placa de Poliestireno mais

filme foi inserida como isolante entre as aletas de aquecimento e resfriamento. Isso garante uma maior precisão no encaixe do TEG.

Figura 8 - Placa de Poliestireno.

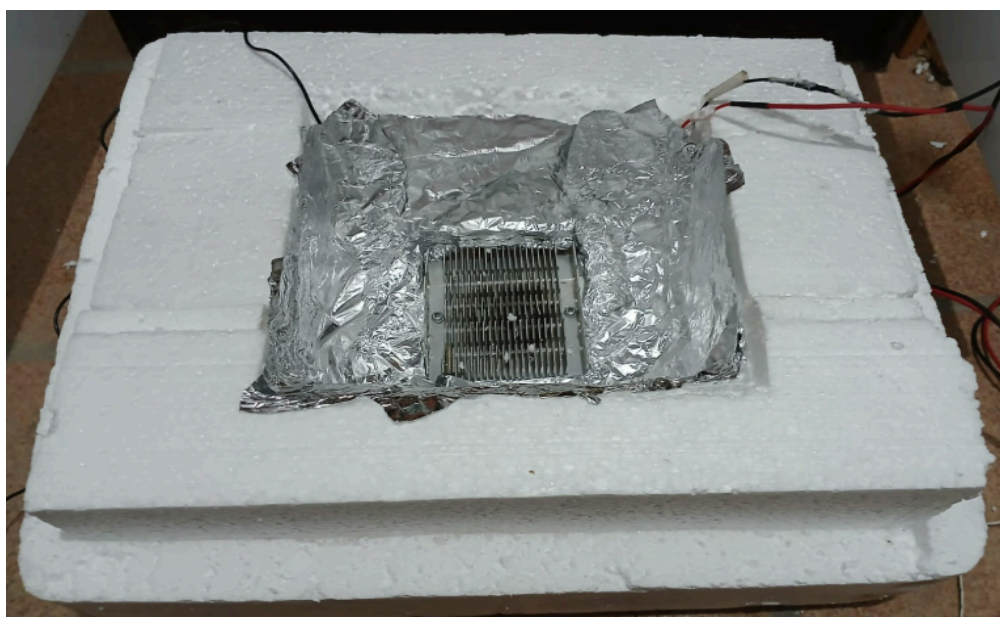


Fonte: (Autor, 2024)

3.1.5 Fixação e Isolamento

Após isolar o TEG, ela foi fixada no fundo da caixa com cola de Poliestireno e vedada com sacos plásticos nos cantos para evitar infiltrações. Em seguida, pedaços de Poliestireno em forma de paralelepípedos foram colados no interior da caixa para reduzir a área de aquecimento. As paredes internas foram revestidas com papel alumínio, concentrando a radiação solar na aleta de aquecimento.

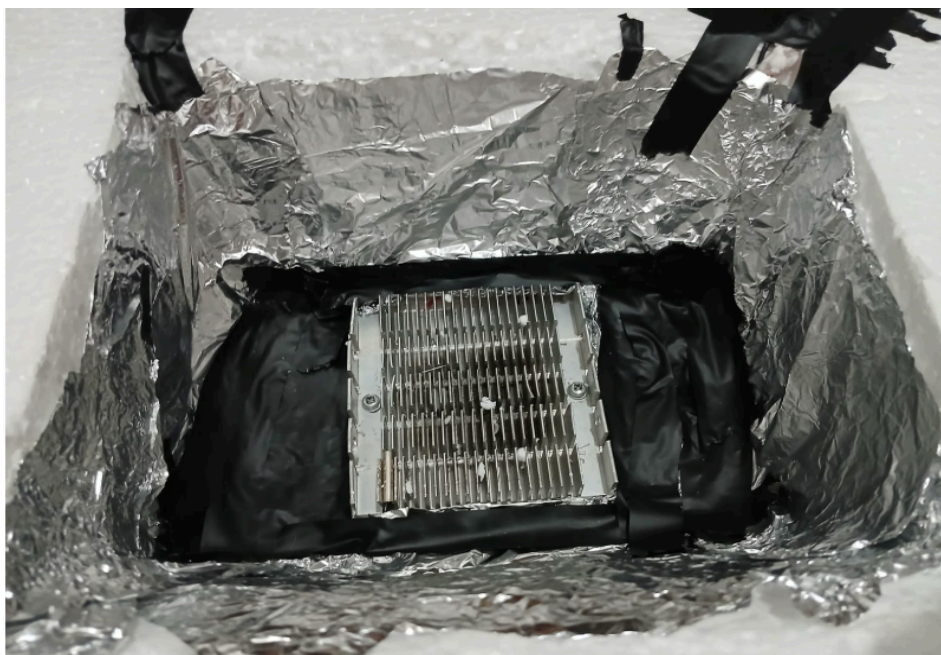
Figura 9 - Sistema isolado com Poliestireno e papel alumínio.



Fonte: (Autor, 2024)

Além disso, no fundo da caixa, foi aplicada fita isolante de cor preta, que contribui tanto para o isolamento térmico quanto para maximizar a absorção e o foco da radiação solar na aleta de aquecimento.

Figura 10 - Sistema isolado com Poliestireno, papel alumínio e fita isolante.



Fonte: (Autor, 2024)

Figura 11 - Sistema isolado com Poliestireno, papel alumínio e fita isolante.



Fonte: (Autor, 2024)

3.1.6 Controle de Temperatura

Acoplamos um termopar na aleta de aquecimento, centralizado na superfície superior da aleta. Essa posição foi escolhida para evitar interferência na eficiência da absorção de calor pelo TEG. Outro termopar foi acoplado à aleta de resfriamento para medir a temperatura da extremidade submersa em água.

Figura 12 - Display Termometro Digital com Sonda NTC.



Fonte: Saravati ([SARAVATI, 2024](#)).

Figura 13 - Termopar tipo K.

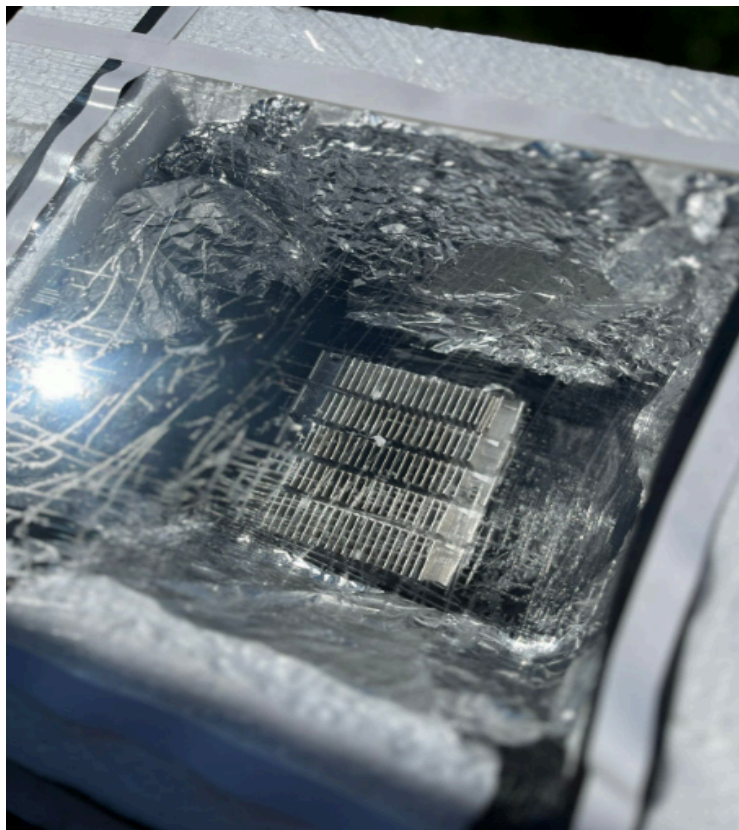


Fonte: AutoCore Robótica ([AUTOCORE ROBÓTICA, 2024](#)).

3.1.7 Proteção Contra Perdas de Calor

Duas camadas de filme PVC foram aplicadas na parte superior do sistema para criar um efeito estufa, aumentando a temperatura da aleta de aquecimento e reduzindo perdas de calor por convecção do vento.

.Figura 14- Sistema isolado com filme PVC.



Fonte: (Autor, 2024)

Posteriormente, foi acrescentada uma camada de vidro sobre o filme PVC, aprimorando o isolamento térmico e aumentando a eficiência do sistema ao reduzir as perdas de calor. Entre o vidro e o poliestireno, foi fixada uma lona, reforçando ainda mais o isolamento.

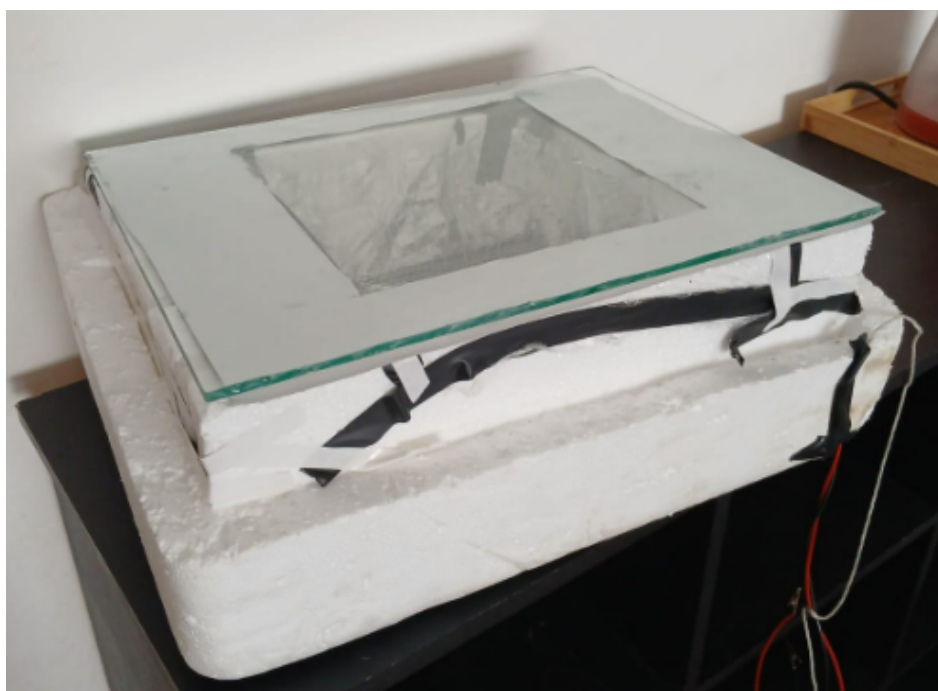
Figura 15- Sistema isolado com filme PVC e lona.



Fonte: (Autor, 2024)

Por fim, o vidro foi fixado à lona, garantindo uma vedação mais eficaz para otimizar o desempenho térmico.

Figura 16 - Sistema isolado com filme PVC e vidro.



Fonte: (Autor, 2024)

3.1.8 Instrumentação

5.1.8.1 Controle de Temperatura (Leitura do termopar tipo K): Multímetro Icel Manaus MD-6490.

Figura 17 - Multímetro Icel Manaus MD-6490.



Fonte: (Autor, 2024)

3.1.8.2 Controle de Tensão e Corrente (Leitura do TEG): Multímetro FoxLux FX-MD.

Figura 18 - Multímetro FoxLux FX-MD.



Fonte: (Autor, 2024)

3.1.8.3 Análise de Dados: Utilização do software Excel para registrar, organizar os valores obtidos e gerar gráficos de resultados.

3.2 Métodos

3.2.1 Experimento 1 - Isolado com Filme PVC - Sem Resfriamento Submerso

O primeiro experimento foi realizado sem resfriar a aleta inferior de forma submersa na água. O objetivo foi coletar valores iniciais de temperatura da aleta de aquecimento (T quente) e da aleta de resfriamento (T frio), bem como os dados de tensão e corrente gerados pelo TEG. Esses resultados servirão como base para comparação com o desempenho do sistema com resfriamento submerso.

Dados Coletados:

- Tempo do experimento;
- Horário do experimento;
- Temperatura da aleta de aquecimento (T quente);
- Temperatura da aleta de resfriamento (T frio);
- Tensão gerada pelo TEG (V teg);
- Corrente gerada pelo TEG (I teg).

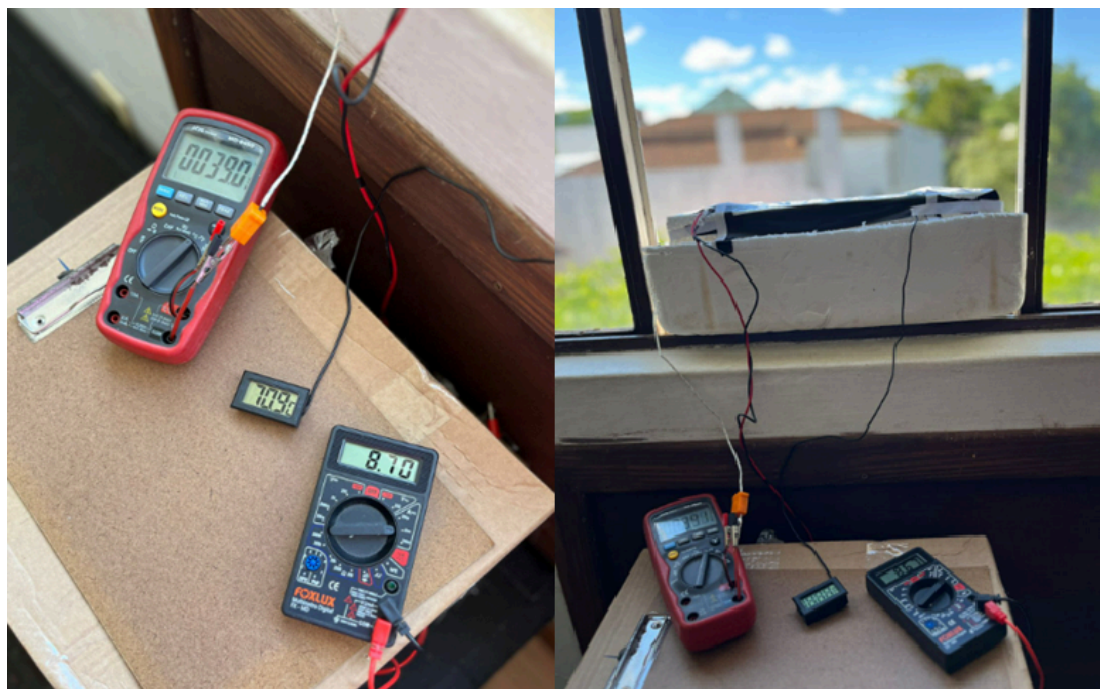
Com esses dados, calculamos a potência gerada (P teg) e a diferença de temperatura (ΔT) entre as extremidades quente e fria.

Figura 19 - Isolado com filme PVC (sem resfriamento submerso).



Fonte: (Autor, 2024)

Figura 20 - Registro de dados.



Fonte: (Autor, 2024)

3.2.2 - Experimento 2 - Isolado com Filme PVC e vidro - Sem Resfriamento Submerso

Após obter os resultados do experimento, vamos acoplar um vidro na parte superior do sistema para aumentar o efeito estufa e conseqüentemente a temperatura de aquecimento do sistema.

O segundo experimento foi realizado também sem resfriar a aleta inferior de forma submersa na água. O objetivo foi coletar valores iniciais de temperatura da aleta de aquecimento (T quente) e da aleta de resfriamento (T frio), bem como os dados de tensão e corrente gerados pelo TEG. Esses resultados servirão como base para comparação com o desempenho do sistema com resfriamento submerso.

Dados Coletados:

- Tempo do experimento;
- Horário do experimento;
- Temperatura da aleta de aquecimento (T quente);
- Temperatura da aleta de resfriamento (T frio);
- Tensão gerada pelo TEG (V teg);
- Corrente gerada pelo TEG (I teg).

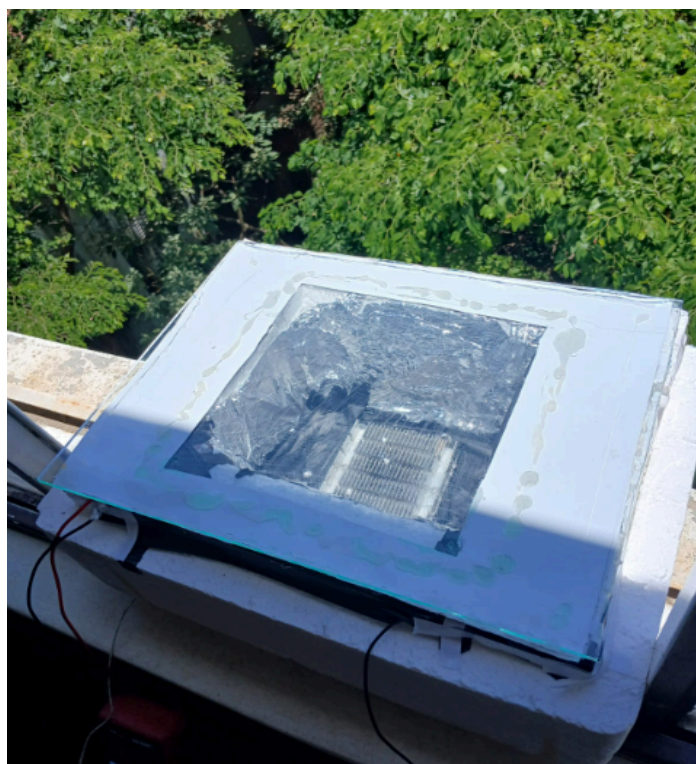
Com esses dados, calculamos a potência gerada (P teg) e a diferença de temperatura (ΔT) entre as extremidades quente e fria.

Figura 21 - Registro de dados experimento 2



Fonte: (Autor, 2024)

Figura 22 - Isolado com filme PVC e vidro (sem resfriamento submerso).



Fonte: (Autor, 2024)

3.2.2 Experimento 3 - Isolado com filme PVC e vidro - Com Resfriamento Submerso

Para finalizar, realizamos o experimento com o sistema submerso em água, buscando reduzir a temperatura da aleta fria e aumentar a diferença de temperatura entre as aletas. Essa abordagem visou otimizar a eficiência do sistema termosolar. O experimento foi conduzido em uma piscina, fornecendo um ambiente controlado para avaliar o desempenho térmico do sistema.

Figura 23 - Obtenção de dados - isolado com filme PVC e vidro (com resfriamento submerso).



Fonte: (Autor, 2024)

4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos experimentos realizados com o sistema termoelétrico desenvolvido, bem como a análise crítica desses dados. Inicialmente, descrevem-se os ensaios sem resfriamento submerso (Seção 4.1.1), contemplando o sistema isolado apenas com filme PVC (Seção 4.1.1.1) e o sistema isolado com filme PVC e vidro (Seção 4.1.1.2). Em seguida, realiza-se a comparação entre esses dois arranjos sem resfriamento (Seção 4.1.1.3). Na sequência, são apresentados os resultados do experimento com resfriamento submerso (Seção 4.1.1.4), que utilizou a configuração com filme PVC e vidro.

Finalmente, realiza-se a comparação entre o sistema sem resfriamento submerso e o sistema com resfriamento submerso (Seção 4.1.1.5). Para cada experimento, são detalhados os dados de desempenho térmico e elétrico, incluindo temperaturas da face quente e fria, variação de temperatura (ΔT) e potência gerada, além da apresentação gráfica dos resultados, permitindo avaliar o comportamento do sistema sob diferentes condições de operação e identificar as configurações mais eficientes.

4.1.1 Experimento 1 - Sem Resfriamento Submerso

4.1.1.1 – Isolado com filme PVC

O Experimento 1 foi realizado no dia **24 de novembro de 2024**, na cidade de Bagé, Rio Grande do Sul, Brasil. Sob as condições de temperatura descritas a seguir.

Figura 24 - Condições de temperatura dia 24/11/2024.

	Temperatura (°C)	Temperatura máx (°C)	Temperatura mín (°C)
24. Novem- bro	20 °C	26 °C	15 °C

Fonte: (CLIMADATE, 2024)

A duração do experimento foi de **uma hora**. Com base nos dados obtidos com multímetros e termopares, foram calculadas a diferença de temperatura entre a face quente e a face fria do TEG, bem como a potência gerada pelo sistema.

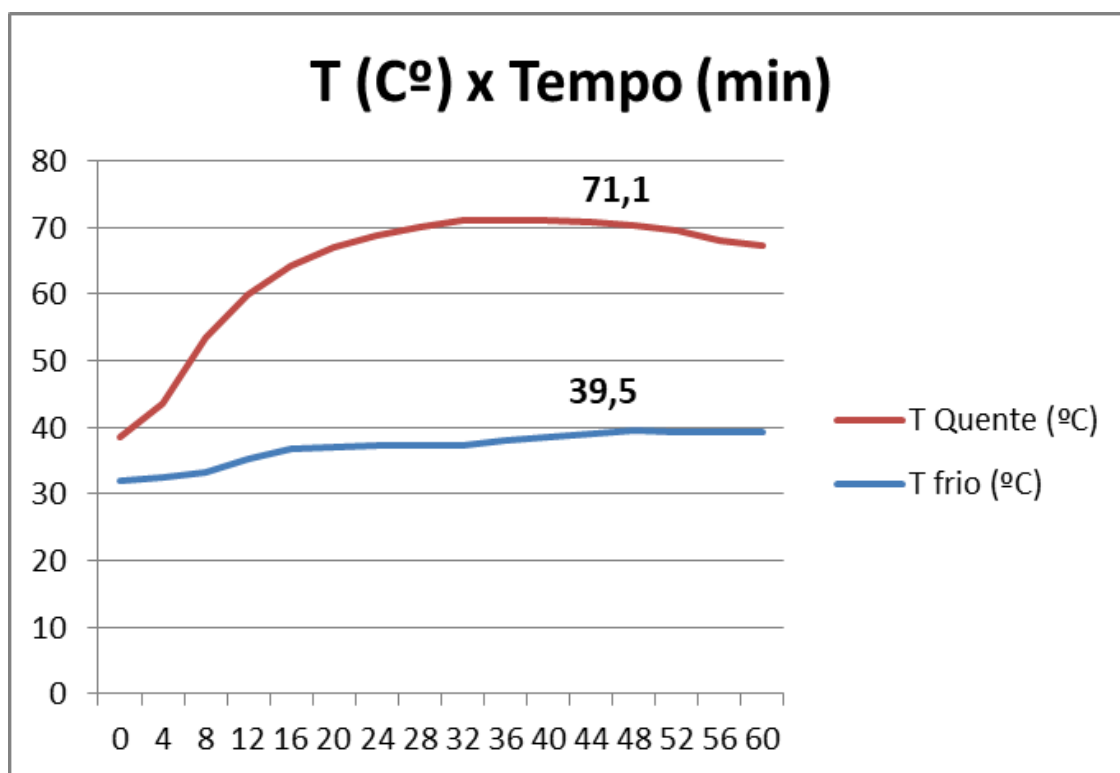
Tabela 1- Experimento 1 Isolado com filme PVC (sem resfriamento submerso)

Hora	Tempo (min)	T Quente (°C)	T frio (°C)	Delta T (°C)	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
14:36	0	38,5	32	6,5	0	0,05	0,05
14:40	4	43,6	32,6	11	0,04	0,94	0,94
14:44	8	53,4	33,3	20,1	0,08	4,95	4,95
14:48	12	59,9	35,3	24,6	0,11	5,7	5,7
14:52	16	64,2	36,8	27,4	0,13	7,58	7,58
14:56	20	67	37	30	0,14	9,04	9,04
15:00	24	68,9	37,2	31,7	0,15	9,15	9,15
15:04	28	70,2	37,3	32,9	0,15	9,41	9,41
15:08	32	71	37,4	33,6	0,16	9,84	9,84
15:12	36	71,1	38	33,1	0,15	9,65	9,65
15:16	40	71,1	38,6	32,5	0,15	8,22	8,22
15:20	44	70,8	39,1	31,7	0,15	8,74	8,74
15:24	48	70,4	39,5	30,9	0,15	9,08	9,08
15:28	52	69,6	39,4	30,2	0,14	9,15	9,15
15:32	56	68,1	39,2	28,9	0,14	8,93	8,93
15:36	60	67,3	39,2	28,1	0,14	8,45	8,45

Fonte: (Autor, 2024)

A partir dos dados, geramos gráficos para analisar os resultados. O Gráfico abaixo representa a temperatura da face quente (T Quente) e a face fria (T Frio) ao longo do experimento 1.

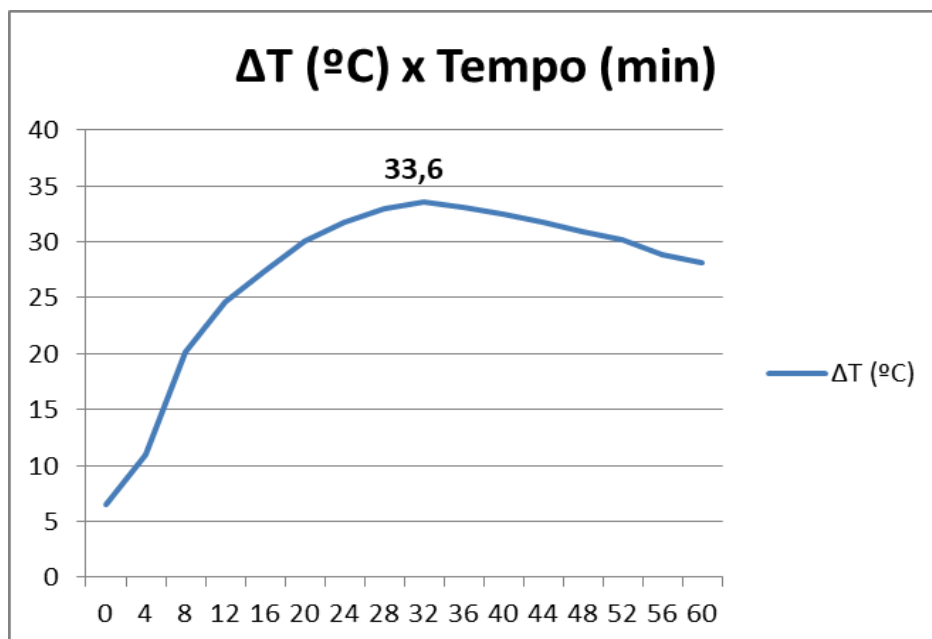
Figura 25 - Gráfico de temperatura vs tempo - experimento 1



Fonte: (Autor, 2024)

O Gráfico a seguir representa a variação de temperatura da face quente (T Quente) e a face fria (T Frio) ao longo do experimento 1.

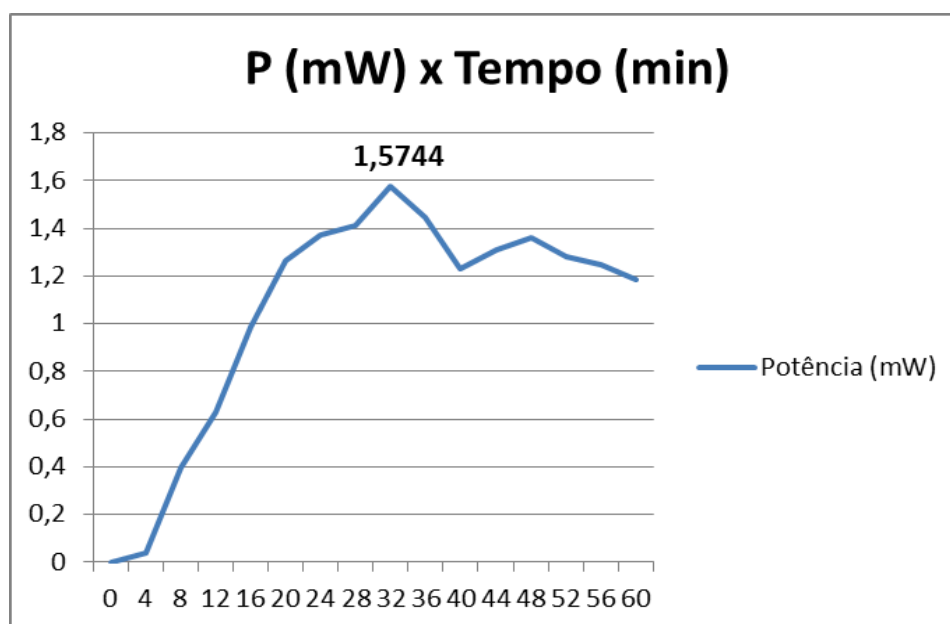
Figura 26 - Gráfico de variação de temperatura vs tempo - experimento 1.1.



Fonte: (Autor, 2024)

O Gráfico a seguir representa os valores de potência por tempo do experimento 1. Os dados estão na unidade de Miliwatts.

Figura 27 - Gráfico de potência vs tempo - experimento 1.1



Fonte: (Autor, 2024)

4.1.1.2 – Isolado com filme PVC e vidro

O Experimento 2 foi realizado no dia **29 de novembro de 2024**, na cidade de Bagé, Rio Grande do Sul, Brasil. Sob as condições de temperatura descritas a seguir.

Figura 28- Condições de temperatura para o dia 29/11/2024.

	Temperatura (°C)	Temperatura máx (°C)	Temperatura mín (°C)
29. Novem- bro	21 °C	27 °C	16 °C

Fonte: (CLIMADATE, 2024)

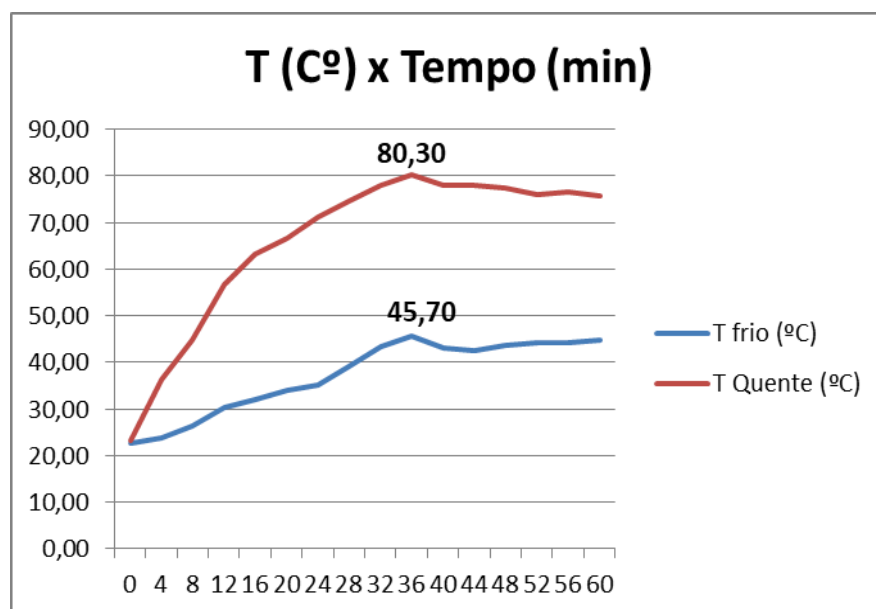
A duração do experimento foi de **uma hora**. Com base nos dados obtidos com multímetros e termopares, foram calculadas a diferença de temperatura entre a face quente e a face fria do TEG , bem como a potência gerada pelo sistema.

Tabela 2- Experimento 2 Isolado com filme PVC e vidro (sem resfriamento submerso)

Hora	Tempo (min)	T Quente (°C)	T frio (°C)	Delta T (°C)	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
12:00	0	23,30	22,60	0,70	0,00	0,00	0,00
12:04	4	36,30	23,80	12,50	0,04	2,22	0,09
12:08	8	44,80	26,40	18,40	0,07	3,44	0,24
12:12	12	56,70	30,40	26,30	0,11	6,05	0,67
12:16	16	63,10	31,90	31,20	0,13	6,65	0,86
12:20	20	66,60	33,90	32,70	0,14	7,23	1,01
12:24	24	71,30	35,20	36,10	0,16	9,54	1,53
12:28	28	74,50	39,20	35,30	0,16	9,87	1,58
12:32	32	77,90	43,40	34,50	0,18	9,12	1,64
12:36	36	80,30	45,70	34,60	0,19	9,51	1,81
12:40	40	78,10	43,20	34,90	0,17	8,55	1,45
12:44	44	78,10	42,50	35,60	0,17	8,71	1,48
12:48	48	77,30	43,60	33,70	0,15	7,97	1,20
12:52	52	76,10	44,20	31,90	0,15	8,12	1,22
12:56	56	76,60	44,30	32,30	0,15	8,31	1,25
13:00	60	75,60	44,82	30,78	0,15	4,82	0,72

A partir dos dados, foi gerado gráficos para analisar os resultados. O Gráfico abaixo representa a temperatura da face quente (T Quente) e a face fria (T Frio) ao longo do experimento 2.

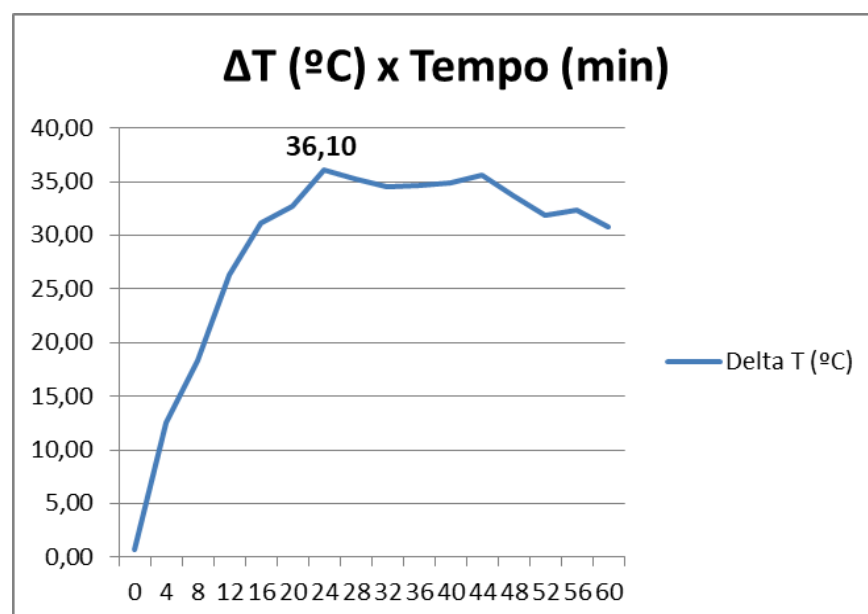
Figura 29 - Gráfico da T quente e T frio do experimento 2.



Fonte: (Autor, 2024)

O Gráfico a seguir representa a variação de temperatura da face quente (T Quente) e a face fria (T Frio) ao longo do experimento 2.

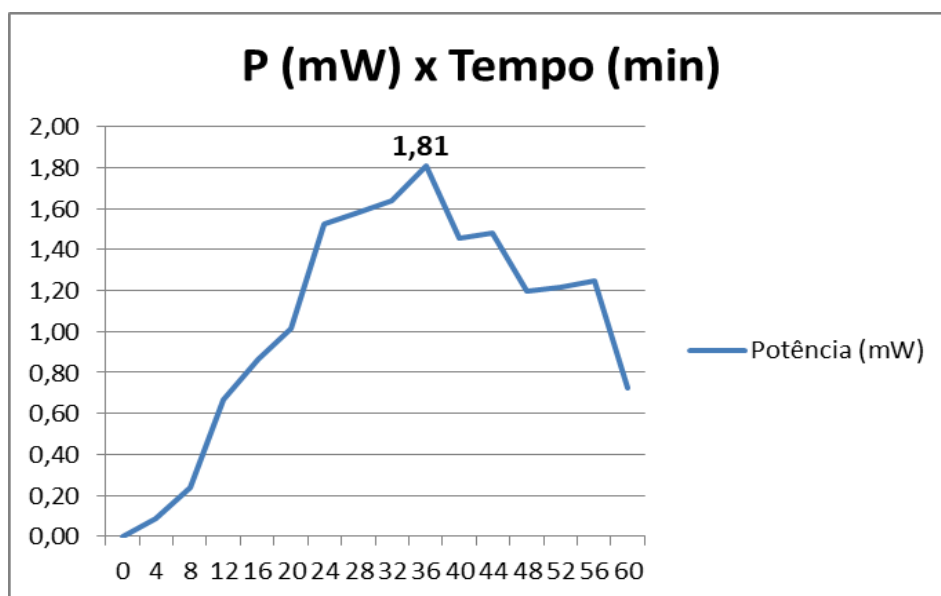
Figura 30 - Gráfico da variação de temperatura por tempo do experimento 2.



Fonte: (Autor, 2024)

O Gráfico a seguir representa os valores de potência por tempo do experimento 2. Os dados estão na unidade de Miliwatts.

Figura 31- Gráfico da potência por tempo do experimento 2.

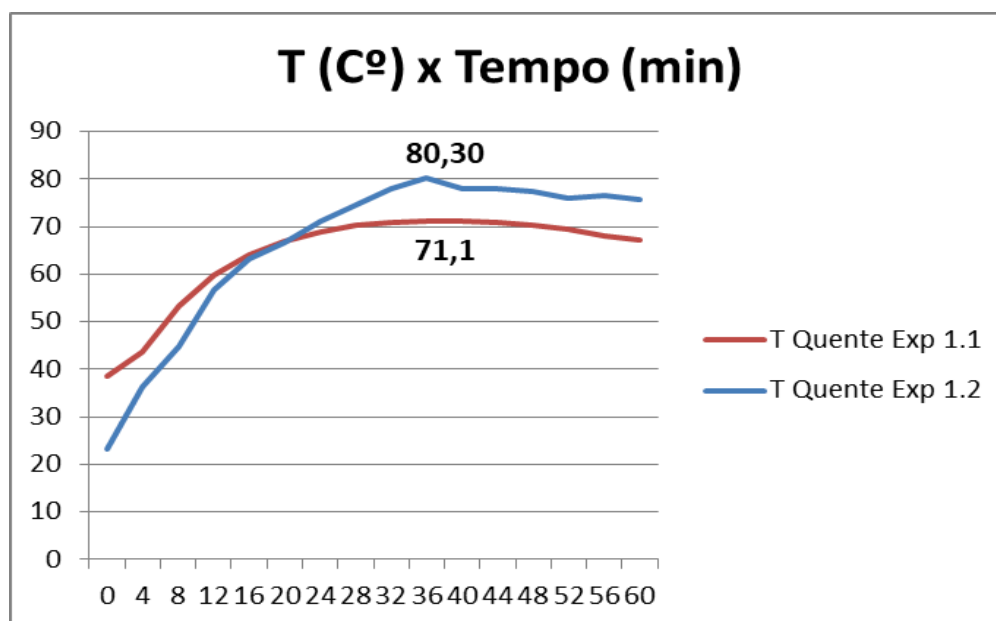


Fonte: (Autor, 2024)

4.1.1.3 – Comparação dos resultados do experimento Isolado com filme PVC x Isolado com Papel Filme e vidro - Sem Resfriamento Submerso

Foram comparados os resultados obtidos com o sistema isolado apenas com filme PVC (experimento 1) e o sistema isolado com filme PVC e vidro (experimento 2). A figura 33 mostra a comparação das temperaturas quentes entre esses dois arranjos.

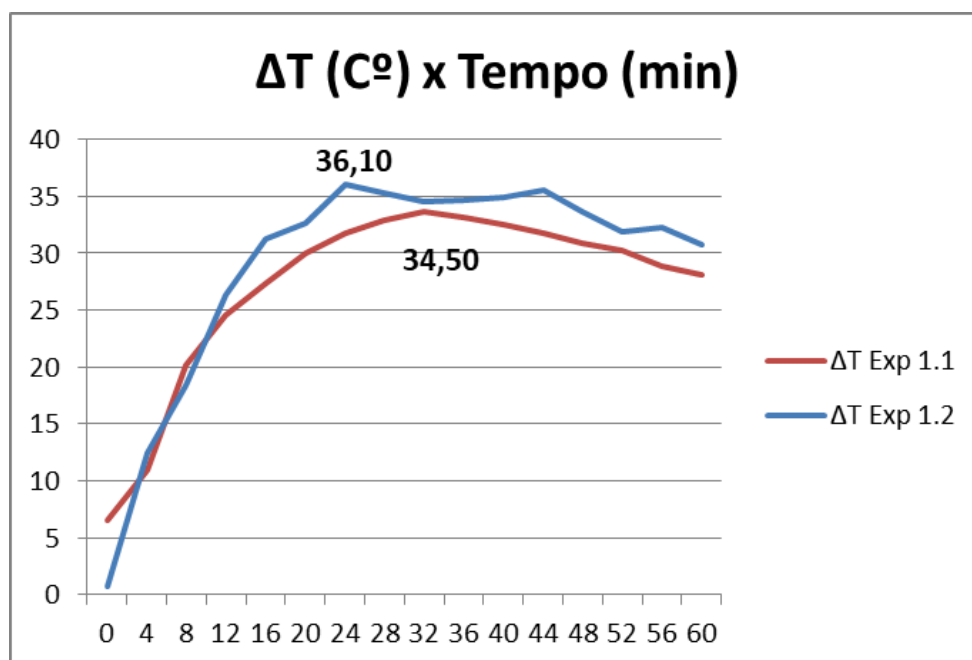
Figura 32- Gráfico de comparação da T quente do experimento 1 e 2.



Fonte: (Autor, 2024)

A figura 34 apresenta a variação de temperatura ao longo do tempo para os experimentos 1.1 e 1.2.

Figura 33 - Gráfico de comparação da variação de temperatura do experimento 1 e 2.



Fonte: (Autor, 2024)

4.1.1.4 Experimento 3 – Com filme PVC e vidro (Com Resfriamento Submerso)

O Experimento 2 foi realizado no dia **29 de novembro de 2024**, na cidade de Bagé, Rio Grande do Sul, Brasil. Sob as condições de temperatura descritas a seguir.

Figura 34 - Condições de temperatura dia 29/11/2024 experimento 3.

	Temperatura (°C)	Temperatura máx (°C)	Temperatura mín (°C)
29. Novem- bro	21 °C	27 °C	16 °C

Fonte: (CLIMADATE, 2024)

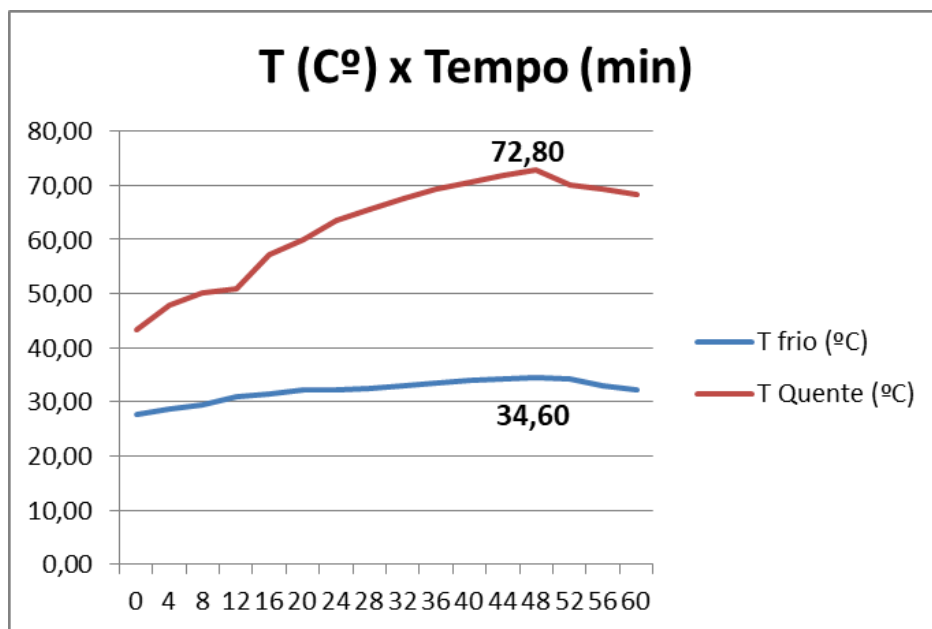
A duração do experimento foi de **uma hora**. Com base nos dados obtidos por meio de **multímetros e termopares**, apresentados na **tabela abaixo**, foram calculadas a variação de temperatura entre a face quente e a face fria do TEG, bem como a potência gerada pelo sistema.

Tabela 3 - Experimento 3 Isolado com filme PVC e vidro (com resfriamento submerso)

Hora	Tempo (min)	T Quente (°C)	T frio (°C)	Delta T (°C)	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
14:25	0	43,30	27,60	15,70	0,07	4,31	0,30
14:29	4	47,80	28,70	19,10	0,08	5,47	0,44
14:33	8	50,10	29,40	20,70	0,09	5,31	0,48
14:37	12	50,80	31,00	19,80	0,10	5,74	0,57
14:41	16	57,20	31,40	25,80	0,13	7,51	0,98
14:45	20	59,90	32,20	27,70	0,13	8,28	1,08
14:49	24	63,40	32,30	31,10	0,15	9,93	1,49
14:53	28	65,60	32,60	33,00	0,16	10,19	1,63
14:57	32	67,50	32,95	34,55	0,17	11,89	2,02
15:01	36	69,20	33,40	35,80	0,18	12,41	2,23
15:05	40	70,70	33,90	36,80	0,19	12,69	2,41
15:09	44	71,90	34,30	37,60	0,20	13,30	2,66
15:13	48	72,80	34,60	38,20	0,21	13,84	2,91
15:17	52	70,20	34,20	36,00	0,19	12,78	2,43
15:21	56	69,20	33,10	36,10	0,18	12,02	2,16
15:25	60	68,40	32,15	36,25	0,18	11,48	1,95

O Gráfico abaixo representa a temperatura da face quente (T Quente) e a face fria (T Frio) ao longo do experimento 3.

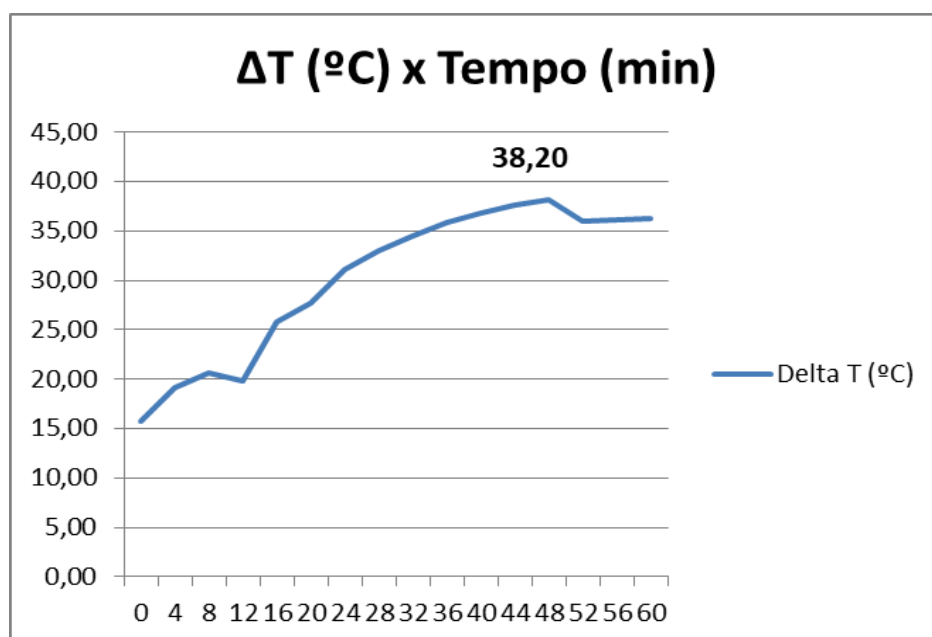
Figura 35 - Gráfico da T quente e T frio do experimento 3.



Fonte: (Autor, 2024)

O Gráfico a seguir representa a variação de temperatura da face quente (T Quente) e a face fria (T Frio) ao longo do experimento 3.

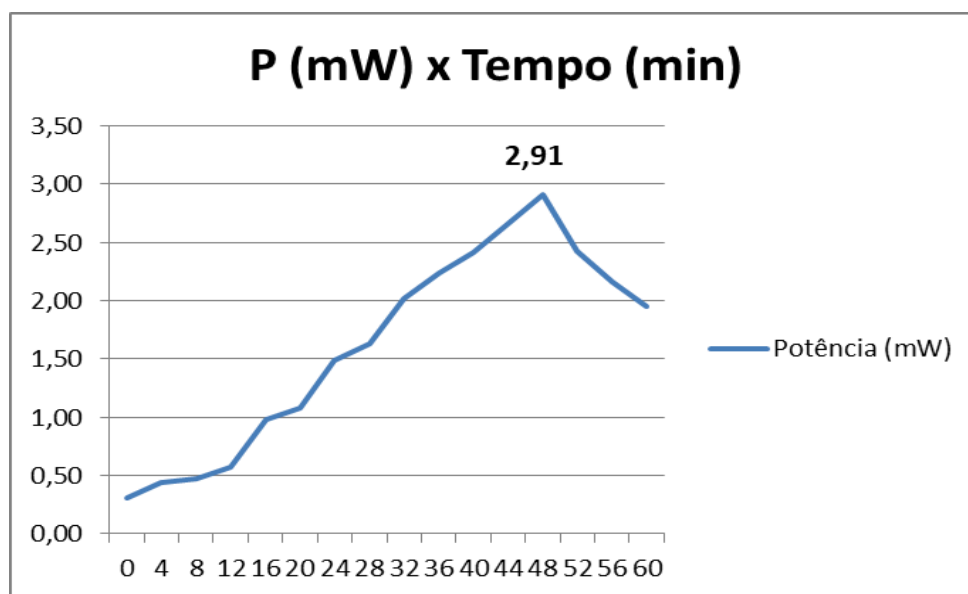
Figura 36 - Gráfico da variação de temperatura do experimento 3.



Fonte: (Autor, 2024)

O Gráfico a seguir representa os valores de potência por tempo do experimento 3. Os dados estão na unidade de miliwatts.

Figura 37 - Gráfico da potência por tempo, do experimento 3.

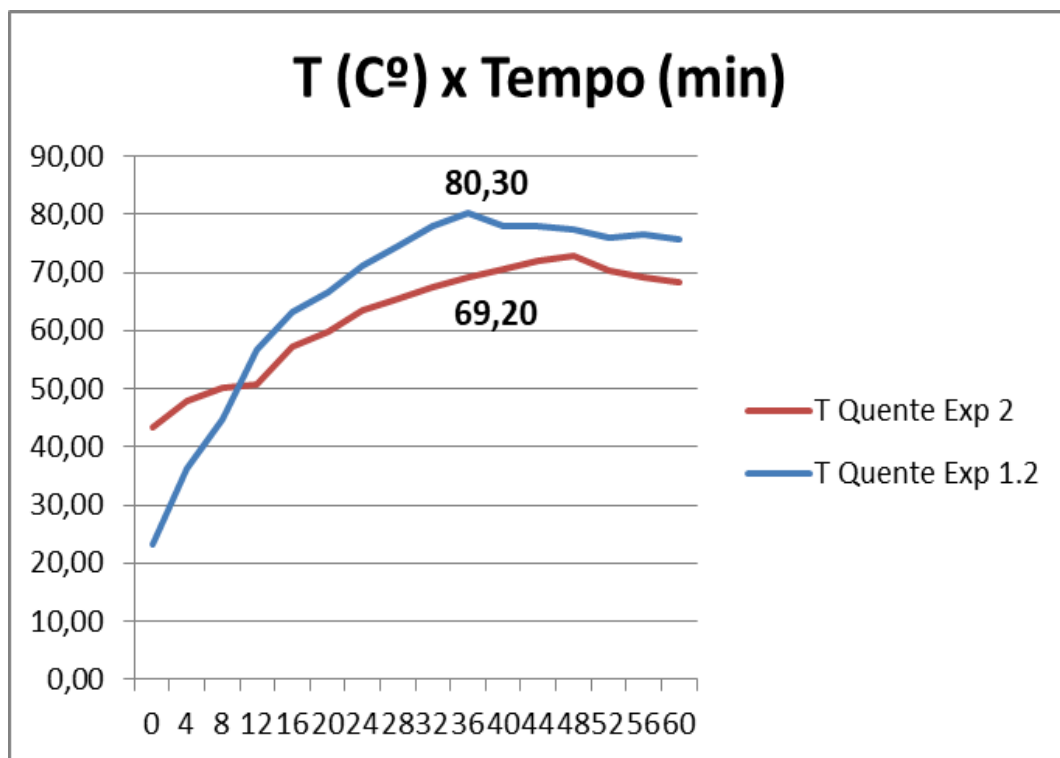


Fonte: (Autor, 2024)

4.1.1.5 – Comparação dos resultados do experimento Isolado com filme PVC e Vidro (sem resfriamento submerso na água) x experimento Isolado com filme PVC e Vidro (com resfriamento submerso na água).

Compararam-se os resultados obtidos com o sistema isolado com filme PVC e vidro sem resfriamento submerso (experimento 2) e o sistema isolado com filme PVC e vidro submerso na água (experimento 3). A figura 39 mostra a comparação das temperaturas quentes entre esses dois arranjos.

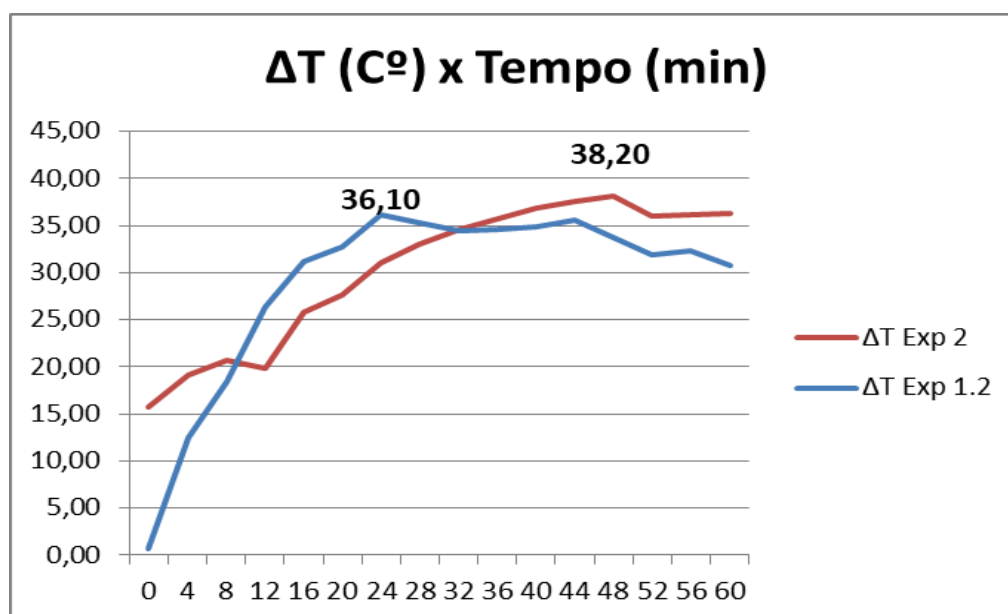
Figura 38 - Gráfico de comparação do T quente do experimento 2 e 3.



Fonte: (Autor, 2024)

A figura 40 apresenta a variação de temperatura ao longo do tempo para os experimentos 2 e 3.

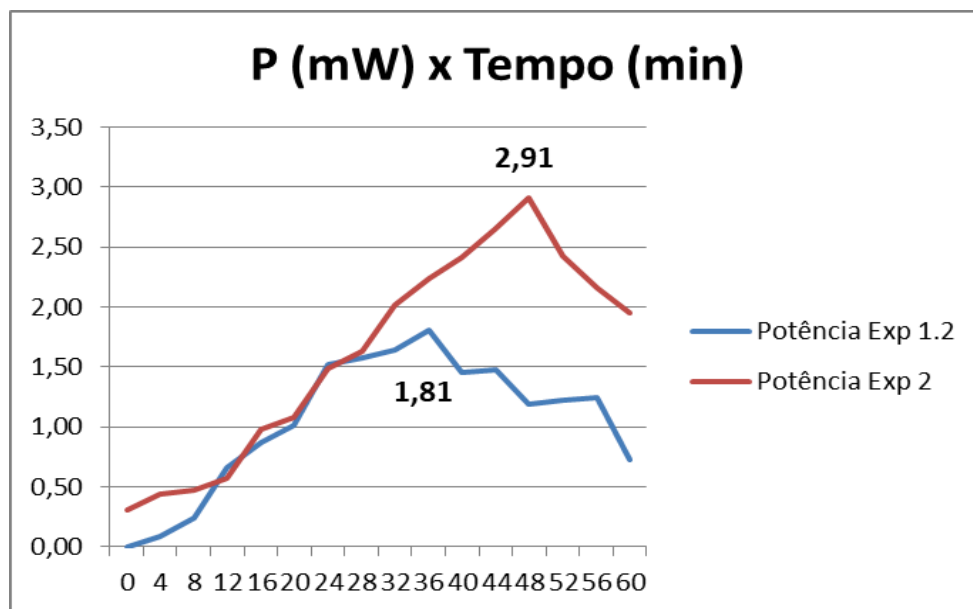
Figura 39 - Gráfico de comparação da variação de temperatura, no experimento 2 e 3.



Fonte: (Autor, 2024)

A figura 41 apresenta a variação da potência em milliwatts ao longo do tempo para os experimentos 2 e 3.

Figura 40 - Gráfico de comparação das potências do experimento 2 e 3.



Fonte: (Autor, 2024)

4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo discute os principais resultados obtidos nos experimentos, relacionando-os com os conceitos teóricos apresentados anteriormente. Inicialmente, analisa-se o desempenho do sistema com resfriamento submerso em comparação ao sistema sem resfriamento (4.2.1), destacando os efeitos sobre a geração de energia elétrica. Em seguida, discute-se a influência da temperatura da água sobre a dissipação de calor e sua contribuição para o aumento do gradiente térmico (4.2.2). A seção 4.3 apresenta uma análise integrada dos dados de potência e temperatura, permitindo compreender o comportamento do gerador termoelétrico frente às diferentes configurações testadas. Por fim, a seção 4.4 traz considerações complementares sobre desempenho, limitações e possíveis aplicações do sistema desenvolvido.

4.2.1 EXPERIMENTO 1 – SEM RESFRIAMENTO SUBMERSO

4.2.1.1 Isolado com Filme PVC

Durante 60 minutos de operação, obteve-se o comportamento térmico e elétrico do sistema isolado apenas com Filme PVC. A temperatura da face quente iniciou-se em 38,5 °C, alcançando 71,1 °C, com estabilização em torno de 70 °C após 36 minutos. A face fria variou entre 32 °C e 39,5 °C. A diferença de temperatura (ΔT) atingiu o valor máximo de 33,6 °C aos 32 minutos, decrescendo posteriormente devido ao sombreamento.

Do ponto de vista elétrico, a tensão estabilizou-se entre 0,14 V e 0,15 V, enquanto a corrente atingiu seu pico de 9,84 mA, resultando em uma potência máxima de 9,84 mW. Esses dados evidenciam a forte dependência da potência gerada em relação ao gradiente térmico. O melhor desempenho do sistema ocorreu quando o ΔT foi máximo, reforçando a eficiência da conversão termoelétrica nesse ponto.

4.2.1.2 Isolado com Filme PVC e Vidro

Neste segundo cenário, o sistema foi isolado com Filme PVC e vidro, monitorado por 60 minutos. A temperatura da face quente aumentou de 23,3 °C para 75,6 °C, enquanto a face fria variou de 22,6 °C a 44,8 °C. A variação térmica aumentou de 0,7 °C para 30,78 °C ao final do experimento.

Houve um aumento gradual na potência gerada, de 0 até 1,58 mW, com leve queda para 0,72 mW. A tensão chegou a 0,15 V e a corrente a 9,87 mA. O uso do vidro proporcionou retenção térmica mais eficiente, o que favoreceu a geração de energia. A estabilização do sistema e o sombreamento, novamente, reduziram a taxa de variação da potência.

4.2.1.3 Comparação entre os dois isolamentos térmicos

Comparando os dois sistemas sem resfriamento submerso, observa-se que o sistema com Filme PVC aqueceu mais rapidamente, mas não alcançou a mesma temperatura da configuração com vidro. A temperatura da face quente chegou a 71,1 °C com Filme PVC e a 80,3 °C com vidro. A face fria também aqueceu mais no sistema com vidro, alcançando 45,7 °C.

Embora o ΔT máximo tenha sido ligeiramente maior no sistema apenas com Filme PVC (33,6 °C contra 36,1 °C no sistema com vidro), este último demonstrou melhor retenção de calor, devido ao efeito estufa gerado pelo vidro. A potência gerada também foi maior com vidro (1,81 mW contra 1,57 mW), confirmando o impacto positivo do vidro na eficiência térmica do sistema.

4.2.2 EXPERIMENTO 2 – COM FILME PVC E VIDRO E RESFRIAMENTO SUBMERSO

Neste experimento, o sistema manteve o isolamento com Filme PVC e vidro, sendo acrescentado o resfriamento submerso na face fria. A temperatura da face quente aumentou de 43,3 °C a 72,8 °C, enquanto a face fria variou de 27,6 °C a 34,6 °C, ambas até os 48 minutos, quando houve sombreamento. A diferença de temperatura (ΔT) chegou a 38,2 °C nesse momento.

A tensão aumentou até 0,21 V, a corrente atingiu 13,84 mA, e a potência máxima foi de 2,91 mW. Após os 48 minutos, todos os parâmetros apresentaram queda, devido à redução da radiação solar.

O desempenho do sistema com resfriamento submerso foi superior, mantendo a face fria em temperaturas significativamente menores, o que aumentou o gradiente térmico e, conseqüentemente, a potência gerada.

4.3 COMPARAÇÃO GERAL DOS EXPERIMENTOS

A Tabela de comparação dos sistemas organizados por legenda é a seguinte:

- **Experimento 1: Sem Resfriamento Submerso**
 - Isolado com Filme PVC
 - Isolado com Filme PVC e Vidro
- **Experimento 2: Com Resfriamento Submerso**
 - Isolado com Filme PVC e Vidro

Em termos comparativos:

- O sistema com resfriamento submerso apresentou maior eficiência térmica, com ΔT máximo de 38,2 °C e potência de até 2,91 mW.
- O sistema com Filme PVC e vidro, sem resfriamento, obteve ΔT de 36,1 °C e potência de 1,81 mW.
- O sistema com apenas Filme PVC teve ΔT máximo de 33,6 °C e potência de 1,57 mW.

Esses dados confirmam que o uso de vidro como isolante melhora a retenção de calor, e o resfriamento submerso aumenta significativamente o desempenho da conversão termoelétrica, mantendo o lado frio efetivamente resfriado.

4.4 CONSIDERAÇÕES COMPLEMENTARES SOBRE DESEMPENHO, LIMITAÇÕES E APLICABILIDADE

Ao comparar os dados obtidos com resultados da literatura, nota-se que o desempenho do sistema termoelétrico desenvolvido é compatível com os parâmetros esperados para o módulo TEC1-12705. Por exemplo, Puspa et al. (2024) relatam uma potência de aproximadamente 300 mW para um ΔT de 32 °C, próximo dos 330 mW obtidos neste trabalho com ΔT de 33,6 °C, evidenciando a confiabilidade dos resultados.

Algumas limitações devem ser consideradas:

- A variação da radiação solar durante o dia afeta o aquecimento.
- A ausência de controle automatizado da temperatura da água de resfriamento limita a estabilidade térmica.
- Medições com termopares em superfícies metálicas com gradientes podem apresentar margens de erro.

Ensaio futuros podem utilizar sensores digitais com aquisição contínua, além de isolamento térmico mais controlado e proteção contra sombreamento.

Apesar da potência gerada não ser suficiente para cargas médias, o sistema mostrou viabilidade para dispositivos de baixo consumo, como sensores ambientais, módulos IoT ou alarmes remotos. Uma produção média de 280 mW durante uma hora resulta em aproximadamente 1,0 kJ de energia, valor suficiente para aplicações intermitentes.

Dessa forma, os resultados indicam o potencial promissor da integração entre aquecimento solar e resfriamento submerso, especialmente em locais com disponibilidade de radiação solar e água, como zonas ribeirinhas e comunidades rurais isoladas.

4.5 Viabilidade Econômica

Em relação à viabilidade econômica do sistema proposto, destaca-se que diversos materiais empregados neste trabalho foram obtidos de forma reutilizada. O poliestireno, popularmente conhecido como isopor, foi recolhido de descartes, reduzindo custos e promovendo a sustentabilidade. Da mesma forma, as aletas metálicas utilizadas foram reaproveitadas de uma adega refrigerada que empregava placas Peltier para seu funcionamento.

Ressalta-se, contudo, que esta situação específica foi possível devido à disponibilidade desses materiais no ambiente de pesquisa. Caso fosse necessário adquirir todos os componentes, seria imprescindível realizar um estudo econômico detalhado para avaliar a viabilidade do projeto. A caixa de poliestireno apresenta custo relativamente baixo no mercado, mas o módulo Peltier e as aletas metálicas podem representar custos mais significativos, variando conforme modelo, potência e fornecedor.

No presente experimento, a placa Peltier empregada foi proveniente de outro projeto acadêmico, desenvolvido pelo colega Matheus Baesso (BAESSO, 2021), que utilizou módulos Peltier com o objetivo de resfriar painéis solares e melhorar a eficiência de geração fotovoltaica.

Diante disso, recomenda-se, para projetos futuros, a realização de testes comparativos com diferentes materiais e configurações, de modo a identificar as soluções mais economicamente viáveis, sem comprometer o desempenho térmico e elétrico do sistema.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho investigou o desempenho térmico e elétrico de sistemas com diferentes tipos de isolamento térmico e formas de resfriamento, focando na geração de energia elétrica a partir de gradientes térmicos. Os experimentos realizados permitiram comparar duas abordagens distintas: um sistema com isolamento de Filme PVC com um sistema de isolamento de Filme PVC e vidro, mostrando o quão mais eficiente é o sistema com o vidro acoplado na sua superfície, que alcançou uma temperatura máxima 12,93 % maior que o sistema sem o vidro.

Na segunda abordagem, comparou-se o sistema isolado com vidro e Filme PVC, sem resfriamento submerso, com o sistema com resfriamento submerso em água. Os resultados mostraram que o sistema sem resfriamento submerso alcançou uma temperatura (T quente) mais elevada, porém a variação de temperatura foi menor. O sistema foi mais eficiente em termos de retenção de calor, em contrapartida menos eficiente na variação de temperatura, alcançando uma temperatura quente (T quente) máxima de 80,30 °C e uma variação de temperatura (ΔT) de 36,10 °C.

O sistema resfriado atingiu uma temperatura (T quente) de 72,80 °C, aproximadamente 7,5 °C mais baixa do que o sistema sem resfriamento. No entanto, a variação de temperatura foi maior, chegando a 38,20 °C, o que representa um aumento de 2,10 °C em comparação ao sistema sem resfriamento. Esses resultados são explicados pela temperatura (T frio) alcançada pela água, que foi de 34,60 °C, enquanto no sistema sem resfriamento a temperatura chegou a 45,70 °C. Essa diferença ocorre devido à dissipação de calor proporcionada pela água, especialmente por estar submersa em um ambiente com um grande volume de líquido, o que mantém a temperatura da água sempre inferior à temperatura do ar.

O sistema com resfriamento submerso apresentou uma dissipação térmica mais eficiente, resultando em um controle mais preciso da temperatura da fonte fria e maior estabilidade na geração de energia. A potência máxima gerada foi de 2,91 mW, com picos de tensão e corrente superiores aos observados no sistema sem resfriamento, que teve uma potência máxima gerada de 1,81 mW, cerca de 37,80 % menor.

O sistema projetado e construído demonstrou viabilidade técnica. A estrutura física desenvolvida, integrando forno solar e resfriamento submerso, foi eficaz em elevar a diferença de temperatura nas faces do TEG. A otimização da absorção térmica por meio do uso de papel alumínio, vidro e materiais isolantes também contribuiu para o desempenho observado.

Portanto, a escolha entre os dois sistemas depende das necessidades específicas da aplicação. Como o foco deste trabalho é a maximização da diferença de temperatura entre as faces quente e fria do TEG, o sistema com resfriamento submerso mostrou-se mais indicado, pois favorece a geração de energia elétrica. Ambas as abordagens apresentaram potencial para aplicações práticas em sistemas de geração de energia térmica, e o trabalho contribui para o avanço do conhecimento na área, oferecendo insights valiosos para a otimização de tecnologias de conversão térmica em energia elétrica.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros incluem a investigação de materiais alternativos para isolamento térmico, como espumas de alta eficiência ou aerogéis, para melhorar a retenção de calor e a eficiência na conversão térmica. Outra direção importante seria testar diferentes fluidos de resfriamento no sistema submerso, como líquidos com maior condutividade térmica, para otimizar a dissipação de calor. Além disso, integrar sistemas fotovoltaicos e termoelétricos poderia aumentar a eficiência global ao aproveitar tanto a radiação solar direta quanto o gradiente térmico. ,

Estudos de longo prazo, incluindo a resistência e durabilidade dos materiais, além de avaliações de ciclo de vida, ajudariam a compreender o desempenho contínuo e a viabilidade comercial dos sistemas. A exploração de aplicações práticas, como dispositivos portáteis ou sistemas off-grid, também seria fundamental para validar a eficiência dos sistemas em contextos reais. Finalmente, a integração com tecnologias de armazenamento de energia permitiria a utilização da energia gerada em momentos de baixa eficiência, ampliando as possibilidades de uso e aplicabilidade dos sistemas.

ANEXOS

ANEXO A – Resumo do Trabalho Apresentado no 16º SIEPE

O presente trabalho foi apresentado no 16º SIEPE – Salão de Inovação, Ensino, Pesquisa e Extensão da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA).

Resumo

Este projeto propõe o desenvolvimento de um sistema híbrido de geração de energia elétrica, combinando geradores termoelétricos (TEGs) com coletores solares e resfriamento submerso em água. A proposta utiliza o efeito Peltier-Seebeck para converter gradientes térmicos em energia elétrica, aproveitando a diferença de temperatura entre a superfície aquecida por radiação solar e uma base de resfriamento imersa em água.

A estrutura do sistema é composta por duas placas Peltier acopladas a dissipadores de calor (aletas), dispostas em uma caixa de isopor que atua como flutuador. Na parte superior, utiliza-se uma cobertura de vidro, funcionando como um forno solar que intensifica a retenção de calor. Na base, as aletas ficam submersas, garantindo a dissipação térmica eficiente. Essa configuração aumenta o diferencial de temperatura entre os lados quente e frio da célula, elevando a eficiência na conversão de energia.

O sistema mostrou-se tecnicamente viável e apresenta potencial para aplicações em regiões isoladas, onde a geração de energia por fontes convencionais é limitada. Devido à baixa potência gerada, o uso é indicado para dispositivos de pequeno consumo, como sensores ambientais ou sistemas de monitoramento. A proposta destaca-se por ser de baixo custo, sustentável e de fácil replicação, contribuindo com soluções energéticas alternativas para contextos remotos ou com infraestrutura limitada.

REFERÊNCIAS

ABU BAKAR, Raihan et al. Experimental electrical characterisation of thermoelectric generator using forced convection water cooling. *Journal of Mechanical Engineering*, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 1–16, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 6. ed. Brasília: ANEEL, 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/atlas>. Acesso em: 13 jul. 2025.

ASWAL, D. K.; BASU, R.; SINGH, A. *Thermoelectric materials and devices*. Amsterdam: Elsevier, 2016. ISBN 978-0-12-801909-1.

ASWAL, Dinesh K.; BASU, Ranita; SINGH, Ajay. Key issues in development of thermoelectric power generators: high figure-of-merit materials and their highly conducting interfaces with metallic interconnects. *Energy Conversion and Management*, [S. l.], v. 114, p. 50–67, 2016.

AUTOCORE ROBÓTICA. Sensor de temperatura termopar tipo K. Disponível em: <https://www.autocorerobotica.com.br/sensor-de-temperatura-termopar-tipo-k>. Acesso em: 24 nov. 2024

BAESSO, Matheus H.. *Sistema Autocompensador de Temperatura para Fonte Fotovoltaica*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) — Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2021. Orientador: Alexandre Ferreira Galio.

CLIMATE-DATA. Bage: clima de novembro. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/americas-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/bage-5944/t/novembro-11/>. Acesso em: 8 dez. 2024.

CUCE, Pinar Mert; KOLAYLI, Sevgi; CUCE, Erdem. Enhanced performance figures of solar cookers through latent heat storage and low-cost booster reflectors. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 427–433, 2020.

EL-ADL, Ahmed S.; MOUSA, M. G.; HEGAZI, A. A. Performance analysis of a passively cooled thermoelectric generator. *Energy Conversion and Management*, [S. l.], v. 173, p. 399–411, 2018.

ENESCU, Diana. Thermoelectric energy harvesting: basic principles and applications. In: ENESCU, Diana (org.). *Green energy advances*. [S. l.]: IntechOpen, 2019. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/green-energy-advances/thermoelectric-energy-harvesting-basic-principles-and-applications>. Acesso em: 21 maio 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *World energy outlook 2022*. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Acesso em: 13 jul. 2025.

JOUHARA, Hussam et al. Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications. *International Journal of Thermofluids*, [S. l.], v. 9, p. 100063, 2021.

KARANA, Dhruv Raj; SAHOO, Rashmi Rekha. Effect on TEG performance for waste heat recovery of automobiles using MgO and ZnO nanofluid coolants. *Case Studies in Thermal Engineering*, [S. l.], v. 12, p. 358–364, 2018.

KIFLEMARIAM, Robel; LIN, Cheng-Xian. Experimental investigation on heat-driven self-cooling application based on a thermoelectric system. *International Journal of Thermal Sciences*, [S. l.], v. 109, p. 309–322, 2016.

LEE, S. et al. Recent advances in thermoelectric devices with low interfacial contact resistance. *Advanced Functional Materials*, v. 30, n. 50, p. 2005200, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.202005200>.

LI, J. et al. Progress and challenges in organic thermoelectric materials and devices. *Advanced Materials*, v. 35, n. 16, p. 2209508, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202209508>.

LI, X.; WANG, Y.; ZHOU, C. Recent advances in thermoelectric generators for self-powered sensors and systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 135, p. 110239, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110239>.

MOURA, R. A.; OLIVEIRA, L. C.; CORRÊA, P. S. Avaliação ambiental e econômica de sistemas isolados com geradores a diesel na Amazônia brasileira. *Revista Brasileira de Energia*, v. 26, n. 2, p. 55–70, 2020.

NOZARIASBMARZ, Amin et al. Bismuth telluride thermoelectrics with 8% module efficiency for waste heat recovery application. *iScience*, [S. l.], v. 23, n. 7, p. 101340, 2020.

PUSPA, Sofia Debi et al. Study characteristic thermal electric generator (TEG) type SP1848 27145 SA. *Jurnal ASIIMETRIK Jurnal Ilmiah Rekayasa & Inovasi*, v. 6, n. 1, p. 77–88, jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.35814/asiimetrik.v6i1.5561>. Disponível em: <https://journal.univpancasila.ac.id/index.php/asiimetrik/article/view/5561>. Acesso em: 13 jul. 2025.

REZANIA, A.; ROSENDAHL, L. A.; ANDREASEN, S. J. Experimental investigation of thermoelectric power generation versus coolant pumping power in a microchannel heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, [S. l.], v. 39, n. 8, p. 1054–1058, 2012.

SARAVATI. Display termômetro digital com sonda NTC: -50 a 110 °C. Disponível em: <https://www.saravati.com.br/display-termometro-digital-com-sonda-ntc-50-a-110-c.html>. Acesso em: 24 nov. 2024.

SILVA, M. J.; LIMA, R. A. Desempenho de sistemas fotovoltaicos em regiões remotas: desafios e perspectivas. *Revista Engenharia e Sustentabilidade*, v. 8, n. 1, p. 112–121, 2021.

SINGH, Baljit et al. The effects of temperature difference and compressive force to the electrical characterization of peltier cell for artificial concentrated solar power thermoelectric application. *Journal of Mechanical Engineering*, [S. l.], v. 11, p. 15–30, 2014.

TU, Yubin et al. A novel thermoelectric harvester based on high-performance phase change material for space application. *Applied Energy*, [S. l.], v. 206, p. 1194–1202, 2017.

ZHANG, T.; FANG, H.; LIU, Z. Enhancement of thermoelectric generator output via solar heating and water cooling. *Applied Thermal Engineering*, v. 224, p. 120022, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.120022>.

ZHAO, L. D. et al. Emerging thermoelectric materials and devices: progress and future directions. *Nature Reviews Materials*, v. 7, p. 388–408, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00432-2>.