

# Geração de Energia Elétrica Utilizando Células Peltier em Sistema Termoelétrico<sup>1</sup>

## *Electricity Generation Using Peltier Cells in a Thermoelectric System*

Carlos Eduardo Weiss<sup>2</sup>  
Paulo Roberto Wander<sup>3</sup>

### Resumo

Este artigo investigou a geração de energia elétrica por células Peltier, explorando o diferencial térmico de fontes domésticas acessíveis, como cafeteira italiana ( $\approx 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e gelo ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Baseado nos efeitos Seebeck e Peltier, o estudo testou até cinco células em série, paralelo e mistas. A maior potência registrada foi de 1012,93 mW, com diferença térmica de  $88\text{ }^{\circ}\text{C}$ , em arranjo série/paralelo de quatro células sob carga resistiva. A maior tensão foi de 4,69 V em circuito aberto com cinco células em série, e a maior corrente, 452,2  $\mu\text{A}$ , com quatro células em paralelo sob baixa resistência. A eficiência máxima foi de 1,57%, calculada pela razão entre a potência gerada e a taxa de calor transferido ( $\dot{Q}$ ), com valores abaixo de 1% na maioria das configurações. Os resultados demonstram a viabilidade da conversão de calor residual em eletricidade em pequena escala, contribuindo para soluções sustentáveis e de reaproveitamento energético no ambiente doméstico.

**Palavras-chave:** Geração de energia, células Peltier, efeito Seebeck.

### Abstract

*This study investigated the generation of electrical energy using Peltier cells, exploring the thermal gradient from accessible household sources such as a moka pot ( $\approx 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and ice ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Based on the Seebeck and Peltier effects, tests were conducted with up to five cells arranged in series, parallel, and mixed configurations. The highest power output was 1012.93 mW under an  $88\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperature difference, using a series/parallel setup of four cells under resistive load. The highest open-circuit voltage was 4.69 V with five cells in series, while the highest current, 452.2  $\mu\text{A}$ , was obtained with four cells in parallel under low resistance. The maximum observed efficiency was 1.57%, calculated as the ratio between the electrical power generated and the heat transfer rate to the module ( $\dot{Q}$ ), with most configurations below 1%. The results demonstrate the feasibility of small-scale heat-to-electricity conversion, contributing to sustainable and energy-reuse solutions for residential use.*

**Keywords:** Energy generation; Peltier cells; Seebeck effect.

---

<sup>1</sup> Este artigo é resumo do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica apresentado na Universidade do Vale dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS, Brasil, em 03/12/2024, sob orientação do Prof. Dr. Paulo Roberto Wander.

<sup>2</sup> Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade do Vale dos Sinos, São Leopoldo, RS. <https://orcid.org/0009-0003-2029-8537>. E-mail: [cw071197@gmail.com](mailto:cw071197@gmail.com)

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Mecânica pela UFRGS. Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Unisinos. <https://orcid.org/0000-0003-3950-4479>. E-mail: [prwander@unisinos.br](mailto:prwander@unisinos.br)

## 1 Introdução

A busca por fontes alternativas e renováveis de energia tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias que aproveitam o calor residual e outras formas de energia térmica, transformando-as em energia elétrica. Neste contexto, Os elementos termoelétricos estáticos, como as células Peltier, têm se destacado por sua capacidade de converter gradientes de temperatura diretamente em eletricidade, sem partes móveis e com manutenção mínima. Esses dispositivos se baseiam nos efeitos Seebeck e Peltier, aproveitando a diferença de temperatura entre suas faces para gerar tensão elétrica. Ao contrário dos sistemas termelétricos convencionais — como as usinas termelétricas a vapor, que utilizam turbinas, geradores e combustíveis fósseis para produzir energia — os elementos termoelétricos oferecem uma alternativa compacta e silenciosa, adequada para aplicações em pequena escala e contextos de reaproveitamento energético.

O princípio de funcionamento dos sistemas termoelétricos está fundamentado em três efeitos principais: Seebeck, Peltier e Thomson, sendo o efeito Seebeck o mais relevante para a geração de energia elétrica. O efeito Seebeck ocorre quando um gradiente de temperatura ( $\Delta T$ ) é imposto sobre um condutor ou semicondutor, resultando na formação de uma diferença de potencial ( $\Delta V$ ) devido ao movimento dos portadores de carga do lado quente para o lado frio. A magnitude dessa resposta é quantificada pelo coeficiente de Seebeck ( $S$ ), conforme descrito pela relação (equação 1), e amplamente documentado por Çengel e Boles (2013).

$$S = -\Delta V / \Delta T \quad (1)$$

O sinal do coeficiente de Seebeck também permite distinguir o tipo de material utilizado: positivo para materiais tipo-p e negativo para materiais tipo-n.

Complementarmente, o efeito Peltier, considerado o inverso do efeito Seebeck, manifesta-se quando uma corrente elétrica aplicada entre duas junções de materiais distintos induz uma diferença de temperatura, permitindo o aquecimento ou resfriamento seletivo. Esse fenômeno viabiliza a construção de dispositivos de resfriamento eletrônico, conhecidos como células Peltier, cuja aplicação vai desde a climatização de componentes eletrônicos até a refrigeração de instrumentos de precisão.

Além desses efeitos fundamentais, os termopares constituem aplicações práticas diretas do efeito Seebeck, sendo utilizados para medição de temperatura com base na tensão gerada entre duas junções metálicas mantidas em temperaturas diferentes. Nos sistemas termoelétricos mais avançados, como as células Peltier, pares de semicondutores tipo-p e tipo-n são dispostos em série elétrica e paralelo térmico, otimizando a transferência de calor e a geração de energia elétrica a partir de diferenças térmicas, conforme descrito por Pérez-Aparicio, Palma e Taylor (2012) e Zoui *et al.* (2020).

Os geradores termoelétricos (TEGs), por sua vez, operam a partir do efeito combinado de Seebeck-Peltier, sendo capazes de converter calor em eletricidade de forma direta. A tensão gerada por um TEG é diretamente proporcional ao coeficiente de Seebeck e à diferença de temperatura entre suas junções quente ( $T_h$ ) e fria ( $T_c$ ), expressa por:

$$V_o = \alpha (T_h - T_c) \quad (2)$$

em que  $\alpha$  é o coeficiente de Seebeck do material. Entretanto, como ressaltado por Bharath Y. K. (2021), o valor desse coeficiente é usualmente pequeno (na ordem de  $\mu\text{V/K}$ ). O que impõe desafios técnicos ao desenvolvimento de sistemas eficientes, exigindo o uso de materiais específicos como Telureto de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), Telureto de Antimônio ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ), Telureto de Chumbo ( $\text{PbTe}$ ) e ligas de Silício-Germânio ( $\text{SiGe}$ ), cujas propriedades termoelétricas são otimizadas para diferentes faixas de temperatura.

A eficiência de conversão dos TEGs é frequentemente avaliada pelo fator de mérito termoelétrico (ZT), uma grandeza adimensional que considera o coeficiente de Seebeck, a resistividade elétrica ( $\rho$ ) e a condutividade térmica ( $\lambda$ ) do material, segundo a expressão:

$$ZT = \alpha^2 / (\rho \lambda) \quad (3)$$

Quanto maior o valor de ZT, melhor o desempenho do material como conversor de energia termoelétrica. Entretanto, para aplicações práticas, além do valor de ZT, outros fatores como o grau de dissipação térmica, a resistência interna e a condutância térmica do sistema impactam diretamente o rendimento do gerador.

A eficiência máxima teórica de um módulo termoelétrico, considerando o limite imposto pelo ciclo de Carnot, pode ser descrita pela equação:

$$\eta = \eta_{\text{carnot}} \left( \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + T_1 / T_h} \right) \quad (4)$$

em que  $T_1$  e  $T_h$  representam as temperaturas das superfícies fria e quente, respectivamente.

Adicionalmente, a potência gerada ( $P$ ) por um módulo termoelétrico é dada pelo produto da tensão ( $V_c$ ) e da corrente ( $I_c$ ) obtidas nas extremidades do gerador:

$$P = V_c \cdot I_c \quad (5)$$

Enquanto a potência dissipada na carga ( $P_1$ ) é calculada por:

$$P_1 = I_1^2 \cdot R_1 \quad (6)$$

em que  $I_1$  é a corrente na carga e  $R_1$  a resistência da carga. O rendimento global ( $\eta$ ) do sistema pode ser expresso como a razão entre a potência elétrica de saída e a potência térmica fornecida ( $Q_h$ ):

$$\eta = P_1 / \dot{Q}_h \quad (7)$$

com a potência térmica sendo relacionada ao fluxo de calor pela equação:

$$\dot{Q}_h = -k \cdot A \cdot (\Delta T / \Delta x) \quad (8)$$

em que  $k$  é a condutividade térmica,  $A$  a área da seção transversal e  $\Delta T / \Delta x$  o gradiente de temperatura.

Segundo Wenzel (2015), a implementação de sistemas termoelétricos em contextos práticos depende do correto entendimento da dinâmica de troca de calor e da escolha dos materiais de contato, o que está alinhado com os cuidados adotados na construção do sistema experimental deste trabalho.

Portanto, a concepção de um gerador termoelétrico eficiente depende não apenas da seleção de materiais com alto coeficiente de Seebeck e baixo produto de resistividade elétrica e condutividade térmica, mas também do correto dimensionamento físico e térmico do sistema.

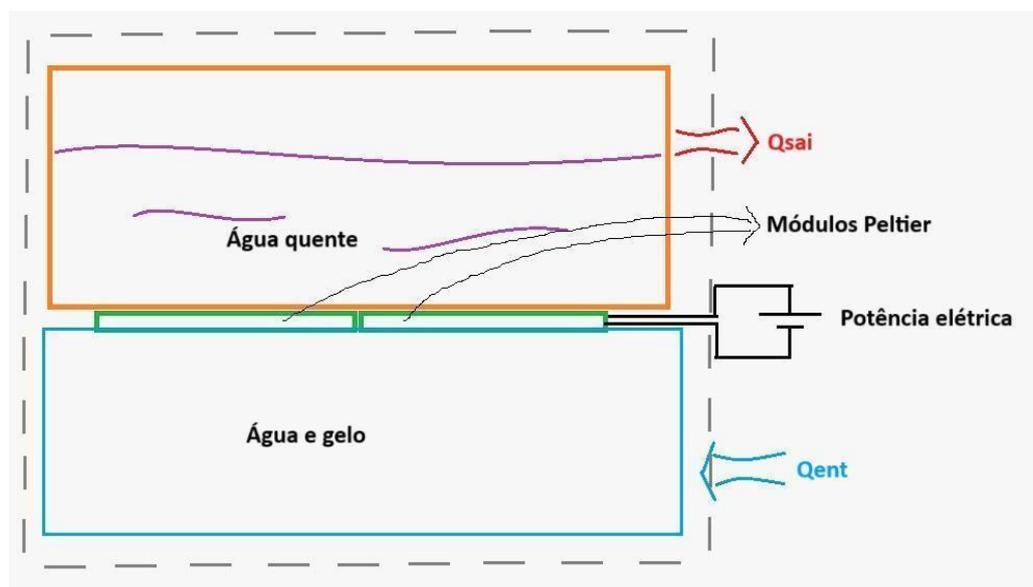
A presente pesquisa busca validar esses achados por meio de experimentação em bancada com diferentes arranjos de células Peltier e fontes térmicas acessíveis, como o calor dissipado em processos industriais ou sistemas automotivos, apresentando medições experimentais de tensão, corrente, potência gerada e rendimento. A seguir, são apresentados os métodos empregados na construção e teste do gerador, bem como a análise dos resultados obtidos.

## 2 Procedimentos metodológicos

Este estudo é uma pesquisa experimental, de natureza aplicada e de caráter exploratório, com o objetivo de desenvolver e avaliar um sistema gerador de energia elétrica por meio de um sistema termoelétrico. O protótipo foi projetado e construído em laboratório, seguindo princípios de engenharia para reutilização da conversão de energia térmica em elétrica. A metodologia adotada seguiu etapas bem definidas: escolha e dimensionamento dos materiais, montagem do sistema, instrumentação para medição e testes experimentais.

Para a realização do experimento, foi utilizado um módulo termoelétrico Peltier modelo TEC1-12706, com dimensões de 40 mm x 40 mm e faixa operacional de  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . O módulo foi posicionado entre duas superfícies condutoras: de um lado, um dissipador de calor de alumínio submerso em água congelada, próxima dos 0 graus Celsius, funcionando como fonte fria, e, do outro, a base de uma cafeteira italiana, com 250 ml de água fervida, funcionando como fonte quente. A disposição geral dos componentes no experimento pode ser visualizada na Figura 1, que apresenta o esquema do módulo termoelétrico instalado entre a fonte quente (cafeteira italiana) e a fonte fria (dissipador de calor submerso em gelo). Este arranjo permitiu a criação de um gradiente térmico controlado, fundamental para análise do desempenho das células Peltier.

Figura 1 – Desenho esquemático do experimento



Fonte: Os autores (2024).

A fonte quente foi gerada a partir do aquecimento de água na base da cafeteira italiana, levada até o ponto de ebulição ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Após esse ponto, a água começou a perder calor

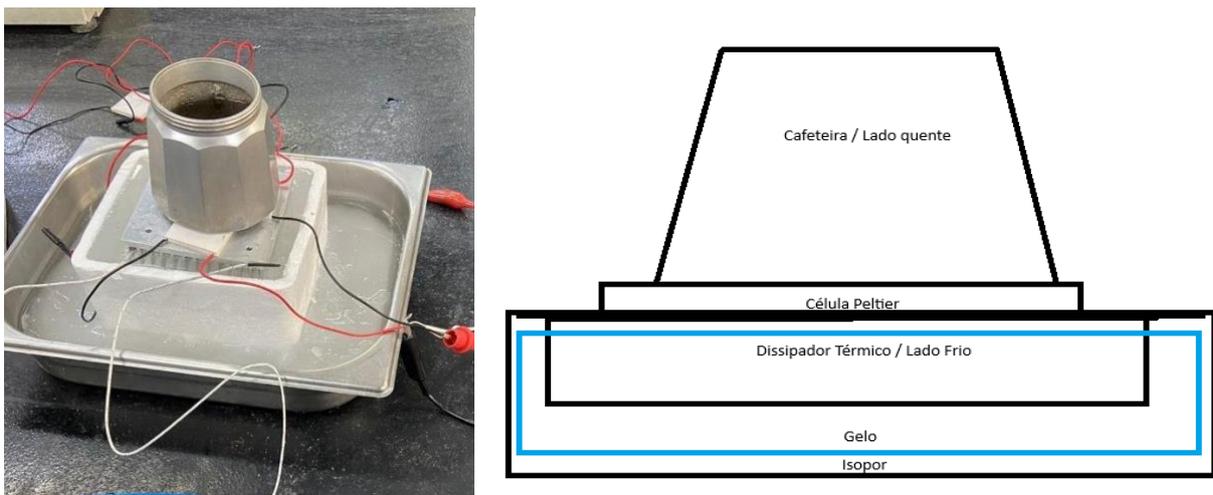
naturalmente para o ambiente, e as medições foram realizadas durante o resfriamento gradual da base da cafeteira, no intervalo de 90 °C até 70 °C. Para estimar a taxa de calor transferida da fonte quente para o sistema nesse processo, utilizou-se a equação da capacidade térmica:

$$\dot{Q} = (m \cdot c \cdot \Delta T) / \Delta t \quad (9)$$

Nesse caso,  $\dot{Q}$  representa a taxa de calor (W),  $m$  é a massa de água utilizada na cafeteira (0,25 kg),  $c$  é o calor específico da água (4186 J/kg·°C).  $\Delta T$  é a diferença de temperatura da água durante o resfriamento, e  $\Delta t$  é o tempo correspondente em segundos. Os valores de temperatura foram medidos desde 90 °C até 70 °C, em decrementos de 1 °C, conforme detalhado nos resultados. A taxa de calor foi utilizada como base para análise da eficiência da conversão termoelétrica ao longo do experimento.

Para garantir uma medição precisa da diferença térmica aplicada, foi desenvolvida uma estrutura de isolamento térmico. Inicialmente, o módulo termoelétrico foi testado sem o isolamento térmico, sendo posicionado diretamente entre a base aquecida da cafeteira e o dissipador de alumínio, de modo a registrar a diferença de temperatura inicial e a tensão elétrica gerada nesse cenário, conforme ilustrado pela figura 2.

Figura 2 – Dispositivo montado sem isolamento térmico



Fonte: Os autores (2024).

Posteriormente, foi realizada uma segunda série de medições com o isolamento térmico aplicado ao redor da cafeteira e do módulo, utilizando uma caixa revestida com material isolante (espuma térmica e papel alumínio), visto pela figura 3, para minimizar as perdas de calor por convecção e radiação.

Figura 3 – Dispositivo montado com isolamento térmico



Fonte: Os autores (2024).

Esse procedimento teve como objetivo reduzir as perdas de calor por convecção e radiação, permitindo uma medição mais precisa da diferença térmica aplicada ao módulo, além de garantir maior estabilidade térmica durante os testes. As temperaturas da fonte quente e da fonte fria foram medidas com um termômetro infravermelho digital modelo MT-320, com faixa de medição de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $380\text{ }^{\circ}\text{C}$  e precisão de  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , posicionado diretamente nas superfícies de contato do módulo. A tensão ( $V_c$ ) e a corrente ( $I_c$ ) geradas pelo módulo termoelétrico foram registradas com um multímetro digital modelo ICEL MD-6450, operando nas faixas de 0 a 20 V (resolução de 0,01 V) e 0 a 10 A (resolução de 0,01 A). Para controle do volume de água na fonte quente, foi utilizada uma balança digital de precisão de 0,1 g, com capacidade máxima de 2 kg. Foram realizadas três séries de medições para cada situação (com e sem isolamento térmico), com tempo de estabilização de 5 minutos entre cada coleta, a fim de garantir a estabilidade térmica do sistema antes do registro dos dados.

A tensão e a corrente geradas pelo módulo termoelétrico foram medidas com o auxílio de um multímetro digital, com faixa de operação de 0 a 20 V (resolução de 0,01 V) e 0 a 10 A (resolução de 0,01 A).

A eficiência de conversão do sistema foi determinada com base na potência elétrica gerada ( $P = V \cdot I$ ) e na diferença de temperatura aplicada, permitindo analisar o desempenho do módulo termoelétrico.

Por fim, os dados de tensão, corrente e diferença de temperatura foram analisados para avaliar o desempenho do sistema termoelétrico. Os testes foram realizados utilizando diferentes configurações de células Peltier do modelo TEC1-12706. As células foram conectadas em série, paralelo e arranjos mistos, com variação de 1 até 5 unidades no total. Em cada configuração, foram registradas as leituras de tensão (V), corrente (A) e a diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) entre a fonte quente e fria. Os testes foram conduzidos tanto com, quanto sem o uso de isolamento térmico, permitindo uma comparação dos resultados obtidos em cada cenário.

### 3 Resultados e discussões

À medida que a fonte quente da cafeteira perde calor para o meio externo e esfria, a tensão e corrente geradas pelo sistema diminuem. Para calcular a eficiência do sistema, utiliza-se a expressão (7) que relaciona a potência gerada pelo sistema ( $P_1$ ) com o calor gerado ( $\dot{Q}$ ). O calor gerado é determinado através do volume de controle e da maior diferença térmica do sistema, sendo calculado pela multiplicação da massa de água na cafeteira, sua capacidade calorífica específica e a variação de temperatura.

A taxa de calor transferida para o sistema é obtida pela diferença entre a taxa de calor total do sistema e a taxa de calor do sistema isolado. Com isso, a eficiência do sistema é calculada pela razão entre a potência gerada e a taxa de calor transferida.

Para o sistema sem carga, não é possível calcular a potência ou eficiência, pois neste caso, a corrente é nula. Todos os dados obtidos foram organizados em uma planilha de Excel, permitindo gerar gráficos e realizar uma análise metódica e precisa do experimento. A tabela 1 apresenta os dados utilizados para o cálculo da taxa de calor transferida da fonte quente, baseado na equação 9: Sendo  $m = 0,25$  kg (massa de água) e  $c = 4186$  J/kg·°C (calor específico da água).

Tabela 1 – Com isolamento – sem carga

| Tqa (°C) | TF (°C) | $\Delta$ temp (°C) | Tempo (s) | Taxa de Calor (W) |
|----------|---------|--------------------|-----------|-------------------|
| 90       | 2       | 88                 | 13,4      | 6872,54           |
| 89       | 2       | 87                 | 16,6      | 5484,67           |
| 88       | 2       | 86                 | 16,15     | 5572,69           |
| 87       | 2       | 85                 | 18,17     | 4895,57           |
| 86       | 2       | 84                 | 19,77     | 4446,43           |
| 85       | 2       | 83                 | 20,02     | 4338,64           |
| 84       | 2       | 82                 | 21,04     | 4078,56           |
| 83       | 2       | 81                 | 21,53     | 3937,13           |
| 82       | 2       | 80                 | 22,42     | 3734,17           |
| 81       | 2       | 79                 | 23,75     | 3480,99           |
| 80       | 2       | 78                 | 25,2      | 3239,17           |
| 79       | 2       | 77                 | 26,4      | 3052,29           |
| 78       | 2       | 76                 | 27,42     | 2900,58           |
| 77       | 2       | 75                 | 28,52     | 2752,02           |
| 76       | 2       | 74                 | 29,98     | 2583,09           |
| 75       | 2       | 73                 | 30,43     | 2510,50           |
| 74       | 2       | 72                 | 33,57     | 2244,50           |
| 73       | 2       | 71                 | 35,11     | 2116,25           |
| 72       | 2       | 70                 | 36,65     | 1998,77           |
| 71       | 2       | 69                 | 38,23     | 1888,79           |
| 70       | 2       | 68                 | 40,73     | 1747,16           |

Fonte: Os autores (2024).

A taxa de calor total calculada nesta etapa é essencial, pois é a partir dela que se determina o calor fornecido para as células Peltier. Observa-se que o tempo necessário para atingir 20 °C foi de 9 minutos e 5 segundos. Na tabela 2, estão listadas as variáveis do experimento com 3 células Peltier, mas no sistema completo, sem a conexão de equipamentos elétricos.

Tabela 2 - Dados – 3 CP – sem carga

| Tensão (V) | Corrente ( $\mu\text{A}$ ) | $\Delta\text{temp}$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Potência (mW) | Tempo (s) | Taxa de Calor (W) | Qmp (W) | Eficiência (%) |
|------------|----------------------------|--|---------------|-----------|-------------------|---------|----------------|
| 4,81       | 5,56                       | 88   | 0,027         | 11,6      | 90,17             | 6779,08 | 0,0004%        |
| 4,68       | 5,45                       | 87   | 0,025         | 12,7      | 82,36             | 5399,69 | 0,0005%        |
| 4,66       | 5,34                       | 86   | 0,025         | 12,9      | 81,09             | 5488,95 | 0,0005%        |
| 4,64       | 5,23                       | 85   | 0,024         | 13,4      | 78,06             | 4815,17 | 0,0005%        |
| 4,62       | 5,12                       | 84   | 0,024         | 13,6      | 76,91             | 4367,40 | 0,0005%        |
| 4,60       | 5,01                       | 83   | 0,023         | 14        | 74,71             | 4261,85 | 0,0005%        |
| 4,54       | 4,9                        | 82   | 0,022         | 14,3      | 73,15             | 4003,47 | 0,0006%        |
| 4,46       | 4,79                       | 81   | 0,021         | 14,5      | 72,14             | 3863,12 | 0,0006%        |
| 4,45       | 4,68                       | 80   | 0,021         | 14,5      | 72,14             | 3660,24 | 0,0006%        |
| 4,36       | 4,64                       | 79   | 0,020         | 14,8      | 70,68             | 3408,65 | 0,0006%        |
| 4,34       | 4,53                       | 78   | 0,020         | 15,6      | 67,05             | 3170,57 | 0,0006%        |
| 4,35       | 4,42                       | 77   | 0,019         | 15,7      | 66,62             | 2984,21 | 0,0006%        |
| 4,30       | 4,31                       | 76   | 0,019         | 16        | 65,38             | 2833,82 | 0,0007%        |
| 4,30       | 4,2                        | 75   | 0,018         | 17,4      | 60,11             | 2690,59 | 0,0007%        |
| 4,21       | 4,09                       | 74   | 0,017         | 17,6      | 59,43             | 2522,42 | 0,0007%        |
| 4,16       | 3,98                       | 73   | 0,017         | 17,6      | 59,43             | 2449,87 | 0,0007%        |
| 4,03       | 3,87                       | 72   | 0,016         | 18,1      | 57,79             | 2185,64 | 0,0007%        |
| 3,92       | 3,76                       | 71   | 0,015         | 18,2      | 57,47             | 2057,77 | 0,0007%        |
| 3,77       | 3,65                       | 70   | 0,014         | 22        | 47,55             | 1950,27 | 0,0007%        |
| 3,64       | 3,54                       | 69   | 0,013         | 22        | 47,55             | 1840,34 | 0,0007%        |
| 3,69       | 3,43                       | 68   | 0,013         | 22        | 47,55             | 1698,78 | 0,0007%        |

Fonte: Os autores (2024).

Nesta configuração, com uma temperatura máxima de  $T_{\text{qa}}$  de  $90^{\circ}\text{C}$ , foi possível obter uma tensão de 4,812 V e uma corrente de 5,56  $\mu\text{A}$ . Se a tensão gerada for considerada o fator principal, seria possível alimentar equipamentos elétricos de até 4V. No entanto, ao analisar a corrente gerada, percebe-se uma grande limitação. Na tabela 3, observa-se que, conforme o gradiente térmico diminui, a variação de temperatura torna-se mais lenta, resultando em uma menor tensão gerada pelo sistema.

Tabela 3 – Dados – 3 CP – em série e com carga

| Tensão (V) | Corrente ( $\mu\text{A}$ ) | $\Delta\text{temp}$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Potência (mW) | Tempo (s) | Taxa de Calor (W) | Qmp (W) | Eficiência (%) |
|------------|----------------------------|--|---------------|-----------|-------------------|---------|----------------|
| 2,43       | 135,4                      | 88   | 329,02        | 5,7       | 183,51            | 6685,74 | 0,005%         |
| 2,32       | 134,3                      | 87   | 311,58        | 6,1       | 171,48            | 5310,57 | 0,006%         |
| 2,2        | 133,3                      | 86   | 293,26        | 7,3       | 143,29            | 5426,74 | 0,005%         |
| 2,17       | 132,7                      | 85   | 287,96        | 7,4       | 141,35            | 4751,88 | 0,006%         |
| 2,05       | 131,1                      | 84   | 268,76        | 8         | 130,75            | 4313,56 | 0,006%         |
| 1,96       | 130,4                      | 83   | 255,58        | 8,6       | 121,63            | 4214,94 | 0,006%         |
| 1,89       | 129,3                      | 82   | 244,38        | 10,2      | 102,55            | 3974,07 | 0,006%         |
| 1,82       | 128,2                      | 81   | 233,32        | 11        | 95,09             | 3840,16 | 0,006%         |
| 1,77       | 127,4                      | 80   | 225,50        | 12,4      | 84,35             | 3648,03 | 0,006%         |
| 1,68       | 126,4                      | 79   | 212,35        | 12,5      | 83,68             | 3395,65 | 0,006%         |
| 1,61       | 125,4                      | 78   | 201,89        | 12,5      | 83,68             | 3153,94 | 0,006%         |
| 1,55       | 125,2                      | 77   | 194,06        | 12,9      | 81,09             | 2969,75 | 0,007%         |
| 1,46       | 124,2                      | 76   | 181,33        | 13,4      | 78,06             | 2821,14 | 0,006%         |
| 1,4        | 123,1                      | 75   | 172,34        | 13,7      | 76,35             | 2674,35 | 0,006%         |
| 1,33       | 121,7                      | 74   | 161,86        | 13,9      | 75,25             | 2506,60 | 0,006%         |
| 1,28       | 119,4                      | 73   | 152,83        | 15,2      | 68,82             | 2440,48 | 0,006%         |
| 1,24       | 117,5                      | 72   | 145,70        | 16        | 65,38             | 2178,06 | 0,007%         |
| 1,2        | 115,9                      | 71   | 139,08        | 16,3      | 64,17             | 2051,07 | 0,007%         |

|      |       |    |        |      |       |         |        |
|------|-------|----|--------|------|-------|---------|--------|
| 1,13 | 115,9 | 70 | 130,97 | 18   | 58,11 | 1939,71 | 0,007% |
| 1,06 | 115,9 | 69 | 122,85 | 18,1 | 57,79 | 1830,10 | 0,007% |
| 1,01 | 119,1 | 68 | 120,29 | 18   | 58,11 | 1688,22 | 0,007% |

Fonte: Os autores (2024).

Nesta configuração, com uma temperatura máxima de  $T_{qa}$  de 90 °C, foram obtidos valores de tensão e corrente de 2,43 V e 135,4 mA, respectivamente. Embora as tensões tenham sido menores, a corrente gerada foi significativamente maior, na ordem de  $10^3$ . É interessante observar que, à medida que o diferencial de temperatura diminui, tanto a tensão, quanto a corrente também diminuem, como demonstrado na tabela 2. O sistema levou 257,2 segundos para perder 20 °C, um tempo inferior ao do sistema isolado por lâ de rocha. De maneira semelhante, a tabela 4 mostra o mesmo comportamento em relação à geração de tensão, à medida que o diferencial térmico entre a fonte quente e fria diminui.

Tabela 4 – Dados – 4 CP – em série e com carga

| Tensão (V) | Corrente ( $\mu$ A) | $\Delta$ temp (°C) | Potência (mW) | Tempo (s) | Taxa de Calor (W) | Qmp (W) | Eficiência (%) |
|------------|---------------------|--------------------|---------------|-----------|-------------------|---------|----------------|
| 3,62       | 236,4               | 88                 | 855,77        | 5,1       | 205,10            | 6664,16 | 0,013%         |
| 3,55       | 224,4               | 87                 | 796,62        | 5,7       | 183,51            | 5298,54 | 0,015%         |
| 3,47       | 221,6               | 86                 | 768,95        | 6,8       | 153,82            | 5416,21 | 0,014%         |
| 3,39       | 211,5               | 85                 | 716,99        | 7,4       | 141,35            | 4751,88 | 0,015%         |
| 3,31       | 207,8               | 84                 | 687,82        | 8,1       | 129,14            | 4315,17 | 0,016%         |
| 3,24       | 197                 | 83                 | 638,28        | 8,6       | 121,63            | 4214,94 | 0,015%         |
| 3,18       | 192,6               | 81                 | 612,47        | 10,3      | 101,55            | 3975,06 | 0,015%         |
| 3,12       | 190                 | 80                 | 592,80        | 11,6      | 90,17             | 3845,08 | 0,015%         |
| 3,04       | 185,2               | 79                 | 563,01        | 12,3      | 85,04             | 3647,34 | 0,015%         |
| 2,98       | 175,5               | 78                 | 522,99        | 12,8      | 81,72             | 3397,61 | 0,015%         |
| 2,91       | 170,6               | 77                 | 496,45        | 12,7      | 82,36             | 3155,26 | 0,016%         |
| 2,83       | 165,2               | 76                 | 467,52        | 12,9      | 81,09             | 2969,75 | 0,016%         |
| 2,77       | 161,7               | 76                 | 447,91        | 13,3      | 78,65             | 2820,55 | 0,016%         |
| 2,69       | 153                 | 75                 | 411,57        | 13,5      | 77,48             | 2673,22 | 0,015%         |
| 2,62       | 149,8               | 74                 | 392,48        | 13,9      | 75,25             | 2506,60 | 0,016%         |
| 2,55       | 145,7               | 73                 | 371,54        | 14,9      | 70,20             | 2439,10 | 0,015%         |
| 2,49       | 140,3               | 72                 | 349,35        | 16,1      | 64,97             | 2178,46 | 0,016%         |
| 2,42       | 135,8               | 71                 | 328,64        | 16,5      | 63,39             | 2051,84 | 0,016%         |
| 2,33       | 132,2               | 70                 | 308,03        | 17,4      | 60,11             | 1937,70 | 0,016%         |
| 2,25       | 128,8               | 69                 | 289,80        | 18,3      | 57,16             | 1830,73 | 0,016%         |
| 2,17       | 125,8               | 68                 | 272,99        | 18,6      | 56,24             | 1690,09 | 0,016%         |

Fonte: Os autores (2024).

Ao colocar uma Célula Peltier adicional, o valor da tensão gerada aumenta, o que era esperado, já que cada célula Peltier no experimento tem uma limitação de aproximadamente 0,8 V. Como as células foram conectadas em série, as tensões geradas por cada uma se somam. Com o aumento no número de células, a corrente também cresce. No entanto, o tempo necessário para o sistema perder 20 °C é semelhante ao observado no sistema com três células Peltier. Com a adição de mais uma célula, a projeção da tensão gerada se torna mais previsível, desde que o diferencial térmico seja definido.

Tabela 5 – Dados – 4 CP – em série/paralelo e com carga

| Tensão (V) | Corrente ( $\mu\text{A}$ ) | $\Delta\text{temp}$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Potência (mW) | Tempo (s) | Taxa de Calor (W) | Qmp (W) | Eficiência (%) |
|------------|----------------------------|--|---------------|-----------|-------------------|---------|----------------|
| 2,24       | 452,2                      | 88   | 1012,93       | 4,8       | 217,92            | 6651,34 | 0,015%         |
| 2,21       | 442,6                      | 87   | 978,15        | 5,1       | 205,10            | 5276,95 | 0,019%         |
| 2,18       | 435,8                      | 86   | 950,04        | 5,5       | 190,18            | 5379,85 | 0,018%         |
| 2,15       | 427,8                      | 85   | 919,77        | 6,1       | 171,48            | 4721,76 | 0,019%         |
| 2,12       | 420,4                      | 84   | 891,25        | 6,4       | 163,44            | 4280,87 | 0,021%         |
| 2,09       | 410,1                      | 83   | 857,11        | 6,9       | 151,59            | 4184,97 | 0,020%         |
| 2,06       | 400,5                      | 82   | 825,03        | 7,5       | 139,47            | 3937,15 | 0,021%         |
| 2,03       | 397,8                      | 81   | 807,53        | 8,1       | 129,14            | 3806,12 | 0,021%         |
| 2,01       | 391                        | 80   | 785,91        | 8,5       | 123,06            | 3609,32 | 0,022%         |
| 1,97       | 381,2                      | 79   | 750,96        | 9         | 116,22            | 3363,10 | 0,022%         |
| 1,94       | 373,8                      | 78   | 725,17        | 9,1       | 114,95            | 3122,67 | 0,023%         |
| 1,85       | 367,2                      | 77   | 679,32        | 9,6       | 108,96            | 2941,88 | 0,023%         |
| 1,74       | 355,5                      | 76   | 618,57        | 10,3      | 101,55            | 2797,64 | 0,022%         |
| 1,71       | 348,7                      | 75   | 596,28        | 11,1      | 94,23             | 2656,47 | 0,022%         |
| 1,66       | 339,3                      | 74   | 563,24        | 11,4      | 91,75             | 2490,10 | 0,023%         |
| 1,62       | 332,2                      | 73   | 538,16        | 11,5      | 90,96             | 2418,34 | 0,022%         |
| 1,58       | 325,9                      | 72   | 514,92        | 12        | 87,17             | 2156,26 | 0,024%         |
| 1,51       | 318,5                      | 71   | 480,94        | 12,4      | 84,35             | 2030,88 | 0,024%         |
| 1,48       | 310,6                      | 70   | 459,69        | 12,6      | 83,02             | 1914,80 | 0,024%         |
| 1,44       | 303,3                      | 69   | 436,75        | 12,8      | 81,72             | 1806,17 | 0,024%         |
| 1,39       | 297,7                      | 68   | 413,80        | 13,7      | 76,35             | 1669,98 | 0,025%         |

Fonte: Os autores (2024).

Ao comparar as tabelas 4 e 5, que mostram os sistemas em série/paralelo e em série, ambos com 4 células Peltier, é possível observar que a corrente fornecida pelo sistema em paralelo é maior, o que era esperado. Por outro lado, a tensão gerada é inferior devido à configuração do sistema. No entanto, ao analisar o tempo necessário para o sistema perder 20  $^{\circ}\text{C}$  para o ambiente externo, constatou-se que o tempo foi de 194,4 s, o que é mais rápido do que o sistema em série. Isso indica que a taxa de transferência de calor no arranjo em paralelo foi superior. Além disso, a potência gerada também foi maior nesse arranjo em paralelo quando comparado ao sistema em série com 4 células Peltier. O arranjo em paralelo proporciona uma corrente mais constante e superior ao do sistema em série. Em situações em que seja necessário maior controle e uma troca térmica eficiente, essa configuração pode ser vantajosa.

Tabela 6 – Dados - 5 CP - em paralelo e com carga

| Tensão (V) | Corrente ( $\mu\text{A}$ ) | $\Delta\text{temp}$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Potência (mW) | Tempo (s) | Taxa de Calor (W) | Qmp (W) | Eficiência (%) |
|------------|----------------------------|--|---------------|-----------|-------------------|---------|----------------|
| 4,69       | 190,22                     | 88   | 892,13        | 5,3       | 197,36            | 6671,90 | 0,013%         |
| 4,62       | 188,45                     | 87   | 870,64        | 5,6       | 186,79            | 5295,26 | 0,016%         |
| 4,53       | 186,45                     | 86   | 844,62        | 6,1       | 171,48            | 5398,56 | 0,016%         |
| 4,46       | 183,91                     | 85   | 820,24        | 6,8       | 153,82            | 4739,41 | 0,017%         |
| 4,38       | 183,14                     | 84   | 802,15        | 7,3       | 143,29            | 4301,02 | 0,019%         |
| 4,31       | 181,18                     | 83   | 780,89        | 7,8       | 134,10            | 4202,46 | 0,019%         |
| 4,25       | 179,6                      | 82   | 763,30        | 8,3       | 126,02            | 3950,59 | 0,019%         |
| 4,18       | 176,3                      | 81   | 736,93        | 8,7       | 120,23            | 3815,02 | 0,019%         |
| 4,11       | 174                        | 80   | 715,14        | 9,2       | 113,70            | 3618,69 | 0,020%         |
| 4,04       | 172                        | 79   | 694,88        | 9,5       | 110,11            | 3369,22 | 0,021%         |
| 3,97       | 170,4                      | 78   | 676,49        | 9,9       | 105,66            | 3131,96 | 0,022%         |
| 3,92       | 168,7                      | 77   | 661,30        | 10,4      | 100,58            | 2950,26 | 0,022%         |
| 3,85       | 166,9                      | 76   | 642,57        | 11        | 95,09             | 2804,11 | 0,023%         |

|      |       |    |        |      |       |         |        |
|------|-------|----|--------|------|-------|---------|--------|
| 3,78 | 165,6 | 75 | 625,97 | 11,5 | 90,96 | 2659,74 | 0,024% |
| 3,72 | 163,7 | 74 | 608,96 | 12,2 | 85,74 | 2496,12 | 0,024% |
| 3,64 | 161,9 | 73 | 589,32 | 12,5 | 83,68 | 2425,62 | 0,024% |
| 3,56 | 160,3 | 72 | 570,67 | 13   | 80,46 | 2162,97 | 0,026% |
| 3,48 | 158,7 | 71 | 552,28 | 13,3 | 78,65 | 2036,59 | 0,027% |
| 3,41 | 156,9 | 70 | 535,03 | 13,6 | 76,91 | 1920,91 | 0,028% |
| 3,34 | 155,3 | 69 | 518,70 | 14,7 | 71,16 | 1816,73 | 0,029% |
| 3,27 | 153,1 | 68 | 500,64 | 15,2 | 68,82 | 1677,51 | 0,030% |

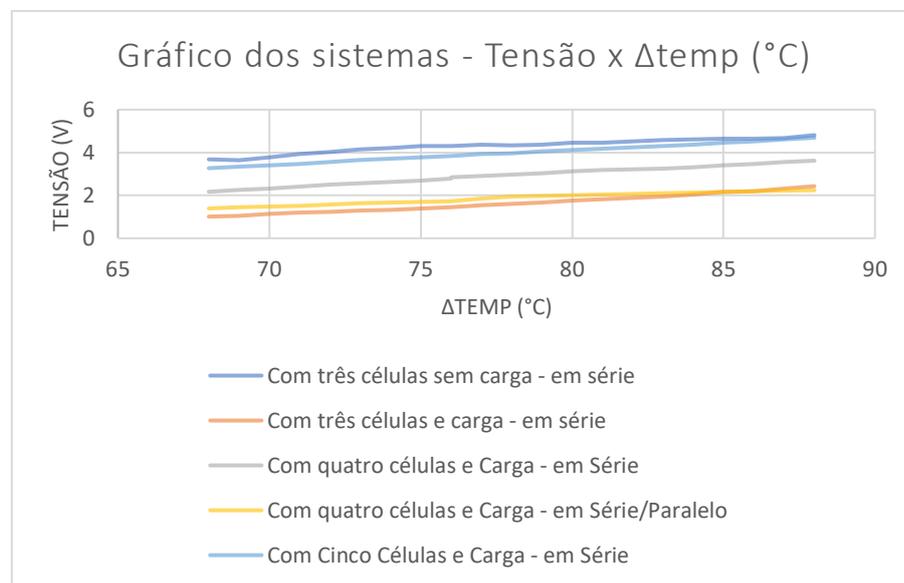
Fonte: Os autores (2024).

Na configuração com 5 células Peltier em série, obteve-se a maior tensão gerada, de 4,69V, quando conectado a um aparelho elétrico. No entanto, a corrente gerada por esse sistema foi inferior à gerada pelo conjunto de 4 células Peltier em paralelo. Isso acontece porque o sistema de 5 células em série favorece o aumento da tensão, enquanto o sistema de 4 células em paralelo favorece o aumento da corrente. Uma observação interessante é que a potência máxima do sistema com 5 células em série, conforme mostrado na tabela 5, foi inferior à potência máxima registrada na tabela 4.

#### 4 Análise da Tensão, Potência e eficiência do sistema

Observando como a tensão varia conforme a  $\Delta\text{Temp}$  e diferentes arranjos de células, é possível identificar as configurações mais eficientes e adequadas para aplicações específicas, otimizando o desempenho do sistema termoelétrico.

Gráfico 1 – Gráfico dos sistemas - Tensão x  $\Delta\text{temp}$  (°C)



Fonte: Os autores (2024).

O gráfico 1 mostra como a configuração das células Peltier e a presença de carga afetam a tensão gerada. Observa-se que a tensão aumenta com a diferença de temperatura ( $\Delta\text{Temp}$ ). A configuração com cinco células em série e carga gerou a maior tensão, seguida por quatro células em série com carga, indicando uma relação quase linear entre o número de células e a tensão. A configuração de três células em série sem carga apresentou maior tensão que com carga, sugerindo que a resistência da carga diminui a tensão. A configuração série/paralelo de quatro

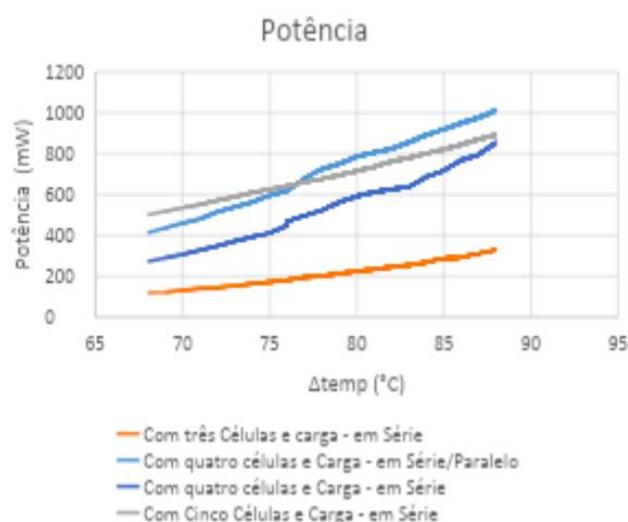
células oferece uma tensão intermediária, equilibrando tensão e corrente. Para sistemas sem carga, não foi calculada a potência nem a eficiência, pois não houve corrente significativa. A eficiência de cada sistema está na tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades utilizadas nos cálculos

| Modelo                                    | (qsist) (W) | Qmp    | PL(J) | Eficiência do Sistema |
|---|-------------|--------|-------|-----------------------|
| Cafeteira com Isolamento e Célula Peltier | 73839,22    | -      | -     | -                     |
| 3 CP - Sem carga                          | 1407,33     | 213,98 | -     | -                     |
| 3 CP - Com Carga                          | 2024,48     | 279,22 | 4,38  | 1,57%                 |
| 4 CP Em série                             | 2059,93     | 279,51 | 2,06  | 0,74%                 |
| 4 CP em Paralelo                          | 2622,60     | 366,34 | 2,62  | 0,72%                 |
| 5 Cp em série                             | 2394,58     | 337,16 | 2,39  | 0,71%                 |

Fonte: Os autores (2024).

A eficiência de conversão de energia das células Peltier foi extremamente baixa em todos os sistemas avaliados. A conversão de energia térmica em elétrica mostrou-se ineficiente, e aumentar o número de células, seja em série ou paralelo, não melhorou a eficiência; pelo contrário, a eficiência diminuiu, possivelmente devido à dissipação térmica ou à distribuição desigual de energia entre as células. O melhor desempenho foi no sistema com três células Peltier com carga, com eficiência de 1,57%, ainda baixa, mas dentro do esperado. Silva (2021) ressalta que a distribuição desigual de calor entre as superfícies da célula Peltier pode comprometer a eficiência do sistema, o que pode ter influenciado os baixos níveis observados em algumas configurações. De modo semelhante, Zoui *et al.* (2020) destacam que a melhoria do desempenho de sistemas termoelétricos também depende da engenharia do dispositivo e da gestão térmica eficiente em toda a superfície de contato, como relatado por Freire (2021), que obteve 2% de eficiência em seu experimento. Isso destaca o potencial para melhorias no design do sistema, como a escolha de células mais eficientes ou a otimização do acoplamento e gestão térmica.

Gráfico 2 – Potência x  $\Delta$ temp ( $^{\circ}$ C)

Fonte: Os autores (2024).

O gráfico de potência em função da variação de temperatura ( $\Delta t$ ) mostra o desempenho de diferentes configurações de células Peltier sob carga. A configuração com três células em série gerou a menor potência, cerca de 300 mW, indicando que essa quantidade é insuficiente para gerar altas potências. A configuração com quatro células em série/paralelo gerou cerca de 1000 mW em  $\Delta t$  de 88 °C, evidenciando que a combinação série/paralelo proporciona maior corrente e eficiência de potência em comparação com o sistema em série. A configuração com quatro células em série gerou cerca de 600 mW em  $\Delta t$  de 88 °C, sugerindo uma limitação na geração de corrente. Por fim, a configuração com cinco células em série alcançou cerca de 800 mW em  $\Delta t$  de 88 °C, mostrando que o aumento do número de células em série também maximiza a tensão. Em resumo, a configuração com quatro células em série/paralelo foi a mais eficiente no intervalo de  $\Delta t$  analisado.

## 5 Conclusões

Este estudo investigou o potencial da geração de energia elétrica a partir de fontes de calor residual, utilizando células Peltier e aproveitando os efeitos Seebeck e Peltier. Em muitos contextos industriais e domésticos, grande parte da energia térmica gerada é desperdiçada, sem qualquer reaproveitamento direto. Exemplos típicos incluem o calor residual liberado em serpentinas de banhos quentes ou nos gases de exaustão gerados por processos térmicos. Nesse cenário, a geração termoelétrica com células Peltier se apresenta como uma alternativa promissora para converter uma parte dessa energia em eletricidade.

O experimento realizado confirmou a capacidade das células Peltier em gerar tensão e potência elétrica proporcionais à diferença de temperatura entre suas faces. A tensão máxima registrada foi de 4,69 V, alcançada com uma diferença de 57 °C entre a superfície da cafeteira e o dissipador térmico em contato com a célula Peltier. Isso demonstra que, à medida que o gradiente térmico aumenta, a potência disponível para a carga também cresce de forma direta. Embora a tensão gerada seja relativamente baixa para o carregamento direto de baterias, o sistema se mostrou eficaz em aplicações de recuperação de energia em pequena escala, como a alimentação de dispositivos de baixa potência ou em processos como o aquecimento de alimentos ou bebidas.

Além disso, a análise do experimento validou o modelo teórico, que prevê que, para uma carga constante, a potência de saída é proporcional à diferença de temperatura entre as faces das células Peltier. Essa relação foi confirmada pelos dados experimentais, reforçando o potencial dos sistemas termoelétricos baseados em células Peltier. Esses sistemas demonstram potencial técnico promissor, especialmente em contextos nos quais a energia térmica residual não é aproveitada de forma eficiente, oferecendo uma alternativa conceitualmente viável para a conversão de calor desperdiçado em eletricidade.

Portanto, a ideia de gerar eletricidade a partir de fontes de calor domésticas, como o calor de uma cafeteira, representa um avanço significativo na busca por tecnologias de reaproveitamento de energia mais limpas e acessíveis. O uso de células Peltier oferece a possibilidade de integrar um sistema simples e de baixa manutenção, promovendo uma abordagem diferente para a redução do desperdício de energia.

## Referências

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics: an engineering approach**. [s.l.]: McGraw-Hill, 2013.

FREIRE, L. O. *et al.* Efficiency in thermoelectric generators based on peltier cells. **Energy Reports**, v. 7, n. 760, p. 355-361, 2021. DOI:10.1016/j.egy.2021.08.099.

PÉREZ-APARICIO, J. L.; PALMA, R.; TAYLOR, R. L. Finite element analysis and material sensitivity of Peltier thermoelectric cells coolers. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 4, p. 1363-1374, 2012. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.08.031.

SILVA, F. A. B. **Modelagem computacional e otimização de um Ciclo Rankine implementado em um processo de cogeração de energia em uma indústria de cimento**. 2021. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Russas, 2021.

WENZEL, T. A. **Análise termodinâmica e simulação de um Ciclo Rankine Orgânico (ORC)**. 2015. 21 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ZOUI, M. A. *et al.* A review on thermoelectric generators: progress and applications. **Energies**, v. 13, n. 14, p. 01-32, 2020. DOI:10.3390/en13143606.