

GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA E PRODUÇÃO DE GRADIENTES DE TEMPERATURA ATRAVÉS DE CORRENTE ELÉTRICA: UMA APLICAÇÃO DOS EFEITOS TERMOELÉTRICOS PELTIER SEEBECK.

João Lucas Oliveira de Andrade ¹
Harley Lucas de Souza Batista²
José Wagner Cavalcanti Silva³
Lino Martins de Holanda Junior ⁴

INTRODUÇÃO

O uso de energia renovável está se tornando cada vez mais importante devido ao reconhecimento do impacto ambiental negativo dos combustíveis fósseis. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a atividade humana, principalmente por meio das emissões de gases de efeito estufa, causou inequivocamente o aquecimento global, com a temperatura média global da superfície no período de 2011-2020 atingindo 1,1°C acima dos níveis de 1850-1900. As emissões globais de gases de efeito estufa continuaram a aumentar, resultantes do uso insustentável de energia para acompanhar as mudanças no estilo de vida dos indivíduos e dos padrões de consumo e produção entre os países. Nesse contexto, uma transição energética para uma matriz sustentável se faz urgente a fim de preservarmos nosso planeta e, dentre as várias possibilidades, o efeito Seebeck tem atraído grande atenção devido a sua capacidade de converter diferenças de temperatura em energia elétrica. O efeito Seebeck, também conhecido como efeito termoeletrico, foi descoberto em 1821 pelo físico alemão Thomas Johann Seebeck. Esse fenômeno ocorre em materiais condutores e semicondutores, onde uma diferença de temperatura em junções de diferentes materiais gera uma diferença de potencial elétrico, criando assim uma corrente elétrica. Essa propriedade intrínseca permite que alguns materiais convertam calor em eletricidade, tornando-os promissores para uso em dispositivos termoeletricos

¹ Graduando do Curso de Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, joao.andrade30247@alunos.ufersa.edu.br;;

² Graduando do Curso de Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, harley.batista@alunos.ufersa.edu.br;

³ Professor co-orientador: doutor, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG (PB), josewagner@ufersa.edu.br;

⁴ Professor orientador: doutor, Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA (RN), lino.holanda@ufersa.edu.br.

(S.P. Beeby, Z. Cao – pg 306 – 328). Ao aplicarmos uma diferença de temperatura na junção de dois materiais distintos, o lado mais quente da junção tem mais energia térmica disponível para os portadores de carga (elétrons no caso de condutores metálicos), o que lhes confere maior energia cinética e, portanto, tendem a se mover em direção ao lado mais frio da junção. Essa migração de portadores de carga gera um acúmulo de carga elétrica nas extremidades da junção. O movimento desigual destes portadores cria uma separação de carga entre as extremidades quente e fria, resultando em uma diferença de potencial entre essas extremidades. Isso ocorre porque os dois materiais usados na junção têm diferentes capacidades de transportar calor e elétrons (ou lacunas), o que provoca um comportamento assimétrico no movimento das cargas em resposta ao gradiente de temperatura.

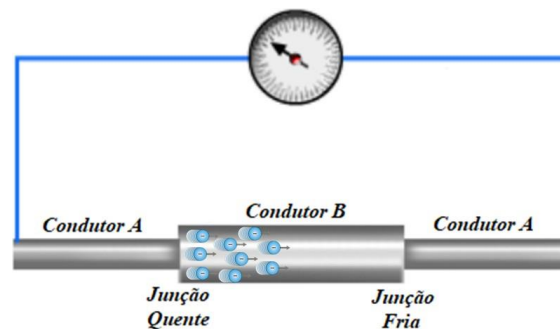


Figura 1. Esquema ilustrativo mostrando dois condutores diferentes ligados entre si e submetidos a diferentes temperaturas em suas junções gerando um movimento dos portadores de carga.

A descoberta de Seebeck que relaciona a diferença de potencial entre duas junções de materiais condutores diferentes submetidas a diferentes temperaturas pode ser expressa por (Thermonamic Module. Datasheet: TEC112706).

$$V = (\alpha_1 - \alpha_2)(T_Q - T_F) \quad (1)$$

Onde:

V : diferença de potencial [V];

α_1, α_2 : poder termoeletrico dos materiais 1 e 2 [V/K];

T_Q, T_F : temperaturas das junções quente e fria, respectivamente [K].

Para pequenas diferenças de temperatura aplicada o comportamento da diferença de potencial gerada é aproximadamente linear. Essa relação está diretamente relacionada ao

coeficiente Seebeck, uma propriedade atrelada à junção de dois materiais (S.P. Beeby, Z. Cao – pg 306 – 328). Usar o efeito Seebeck tem várias vantagens, uma delas é a capacidade de utilizar fontes de calor residual, que são subprodutos de muitos processos industriais e sistemas de geração de energia. Além disso, ao contrário de outras formas de produção de energia, como a queima de combustíveis fósseis, o efeito Seebeck é limpo e não emite poluentes atmosféricos nocivos.

O efeito inverso, ou seja, a conversão de energia elétrica em uma diferença de temperatura é denominado de efeito Peltier que, por se tratar também de um efeito termoelétrico, é extremamente relevante neste cenário devido o seu uso para resfriamento de sistemas de baixa potência, como na refrigeração de componentes eletrônicos. Observado em 1834 pelo físico francês Jean Charles Athanase Peltier, o chamado efeito Peltier consiste na produção de um gradiente de temperatura em uma junção metálica (conhecido como termopar) de diferentes materiais, quando estes são submetidos a uma diferença de potencial.

Quando uma corrente elétrica atravessa a junção de dois materiais distintos, os portadores de carga (elétrons ou lacunas) ganham ou perdem energia térmica ao se moverem de um material para o outro. Dependendo da direção da corrente, a junção entre os materiais pode absorver calor (resfriar) ou liberar calor (aquecer). O material que recebe os portadores de carga pode ter uma maior ou menor afinidade por esses portadores em comparação ao material de onde eles estão vindo. Se os portadores precisam liberar energia para se mover entre os materiais, isso resulta em um aquecimento. Se eles precisam absorver energia, isso resulta em um resfriamento.

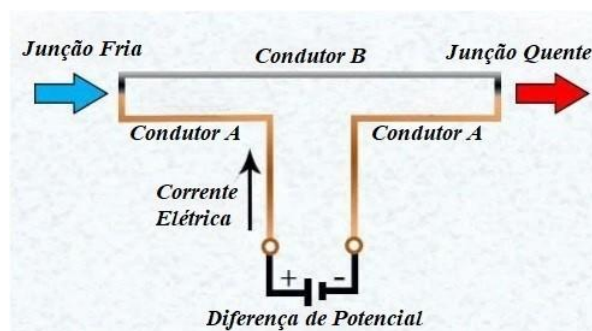


Figura 2. Esquema ilustrativo mostrando dois condutores diferentes ligados entre si e submetidos a uma diferença de potencial resultando em diferentes temperaturas em suas junções.

Esse fenômeno também é conhecido como o inverso do efeito de Seebeck, descoberto 13 anos antes. Na verdade, os efeitos Seebeck e Peltier são diferentes

manifestações do mesmo processo físico (S.P. Beeby, Z. Cao – pg 306 – 328).

Dessa forma, também é possível caracterizar o fluxo de calor gerado ou absorvido no efeito Peltier, ele é definido como uma absorção (ou geração) de calor de uma junção de dois materiais quando atravessados por uma corrente elétrica. O fluxo de calor é absorvido ou gerado dependendo do sentido da corrente, segundo a equação abaixo (PAGHI, C. Eduardo – pg 102):

$$\phi_{peltier} = (\alpha_p - \alpha_n)IT_Q \quad (2)$$

Onde:

$\phi_{peltier}$: Fluxo de calor gerado ou absorvido por efeito Peltier [W]

I: Intensidade da corrente elétrica que atravessa uma junção [A];

Em sistemas que utilizam esses módulos termoeletrônicos não há necessidade de partes móveis, resultando em menor desgaste mecânico e ausência de vibrações. Além disso, esses sistemas são conhecidos por sua extrema leveza. Outras vantagens notáveis incluem o controle preciso de temperatura, menor necessidade de manutenção e redução do espaço físico necessário em comparação com outros tipos de equipamentos de geração energética (Jainne Daniele – 2010).

Apesar do grande potencial do efeito Seebeck, ainda existem alguns desafios a serem considerados. As eficiências relativamente baixas dos materiais termoeletrônicos atualmente disponíveis limitam seu uso em escala comercial. Além disso, a maioria dos materiais termoeletrônicos convencionais são caros e suas propriedades limitam seu uso em certas faixas de temperatura. Embora os resultados e eficiências mudem com junções de materiais diferentes, aplicar o princípio através de componentes mais palpáveis ajuda a entender e projetar os comportamentos que possibilitem a aplicação desse tipo de geração energética.

Apesar de ser extremamente simples de se montar um aparato experimental e observar a geração de eletricidade ou a produção de calor, evidenciando assim os efeitos Seebeck e Peltier, respectivamente, para aplicações didáticas em laboratórios de ensino de ciências, seu uso torna-se impraticável devido às correntes geradas serem extremamente baixas. No entanto, há no mercado módulos termoeletrônicos (placas ou pastilhas peltier) que contém um número consideravelmente grande de junções, além do uso de materiais semicondutores do tipo p e tipo n, os quais são cuidadosamente

dispostos e soldados entre duas placas cerâmicas, como é ilustrado na figura 3 (Jainne Daniele FS – 2010).

Esses módulos conseguem atingir diferenças de potencial consideravelmente alta para serem usadas em alguns sistemas de baixa potência e atingem diferenças de temperatura a ponto de serem usadas em pequenas adegas e/ou mini geladeiras encontradas em veículos automotores.

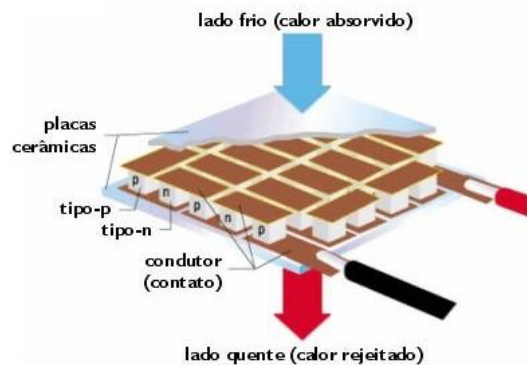


Figura 3. Esquema ilustrativo de uma célula Peltier, destacando os semicondutores tipo n e tipo p conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo

A eficiência de conversão energética, ou coeficiente de desempenho (**COP** na sigla em inglês para "coefficient of performance") de dispositivos termoelétricos refrigeradores é uma quantidade de extrema importância para definir a qualidade de um refrigerador (Jainne Daniele – 2010). O COP é definido como a razão entre o calor extraído da fonte, q_1 , e a energia elétrica utilizada, w , ou seja:

$$\phi = \frac{q_1}{w} \quad (3)$$

Quando uma corrente atravessa uma junção, três processos físicos competem entre si simultaneamente: O resfriamento Peltier, a condução de calor e o efeito Joule. Portanto, a potência de geração, q_1 , nesse caso será dada por:

$$q_1 = (\alpha_p - \alpha_n)IT_Q - (T_Q - T_F)(K_p - K_n) - \frac{1}{2} (R_p + R_n)I^2 \quad (4)$$

Onde K_p , K_n e R_p , R_n são as condutividades térmicas e as resistências elétricas dos semicondutores tipo p e tipo n, respectivamente. Por outro lado, a energia elétrica consumida é composta por dois fatores: a taxa de trabalho para superar a tensão termoelétrica e as perdas resistivas. Podemos expressar esse consumo de energia matematicamente como

$$w = (\alpha p - \alpha n)I(T_Q - T_F) + (R_p + R_n)I^2$$

Se o termopar estivesse livre de perdas associadas à condução de calor e à resistência elétrica, ϕ atingiria o valor ideal, ou seja, o valor para um ciclo de Carnot (S.P. Beeby, Z. Cao – pg 306 – 328). Refrigeradores baseados em tais materiais tipicamente têm um COP de valor aproximadamente igual a 2, valor abaixo do obtido em refrigeradores de compressão de vapor, os quais podem chegar a 3 ou 4, entretanto, não há impedimento teórico conhecido para aumentar significativamente a eficiência da conversão da energia termoelétrica (Jainne Daniele – 2010).

Acerca do conteúdo introduzido, pretendemos expor uma dentre as diversas formas de demonstrar o conceito de energia e como podemos usá-la didaticamente para análises de conservação, utilizando os efeitos Peltier e Seebeck e aproveitando suas qualidades. Tais componentes apresentam uma enorme versatilidade para construção de geradores e estufas de baixa potência.

METODOLOGIA

Neste trabalho montamos duas sequências experimentais com o objetivo de analisar as propriedades quantitativas dos efeitos Seebeck e Peltier. A primeira abordagem busca analisar a geração termoelétrica mediante um gradiente de temperatura, para isso montamos um esquema de refrigeração e calefação de forma a contemplar inicialmente fios de materiais diferentes conectados por soldas e posteriormente as faces fria e quente de um módulo termoelétrico. Já na segunda parte, o intuito foi observar o poder de resfriamento dos módulos termoelétricos, de modo que um protótipo foi montado adaptando dissipadores de calor e "coolers" afim de montar o melhor esquema de resfriamento possível.

Inicialmente objetivamos observar o efeito Seebeck a partir da junção metálicas utilizando fios de cobre e ferro, com diâmetros de 0,730mm e 0,820mm, respectivamente, e mesmo comprimento de 43cm, como ilustrado na figura 1. As fontes de calor utilizadas foram dois recipientes contendo água. Na fonte fria foi posto gelo e

na fonte quente elevou-se a água ao ponto de ebulição. Para analisarmos a variação na ddp gerada em função da diferença de temperatura aplicada, mantivemos a fonte fria em temperatura fixa e variamos a temperatura da fonte quente adicionando pequenas quantidades de água fria com auxílio de uma seringa. As diferenças de potencial foram medidas com o auxílio do multímetro digital (modelo U1252B, fabricante Agilent) e as temperaturas foram aferidas utilizando um termômetro digital (modelo MT-455, fabricante Minipa) aliado a dois termômetros analógicos de mercúrio (modelo Esc Ext -10+110:1C Líq. Vermelho Cap. Amarelo 260x6mm, fabricante Incoterm) para medida simultânea das temperaturas das fontes.

Também analisamos o poder termoelétrico em função do número de junções, onde aumentamos sistematicamente tais junções em série e acompanhamos as alterações ocorridas na diferença de potencial gerada. Foram utilizados ao todo doze fios de cobre e seis fios de ferro cujas junções foram feitas utilizando um ferro de solda. Os resultados mostraram que há um aumento linear na ddp em função do número de junções. A análise através desse esquema, embora bastante didática e esclarecedora, dentro do que era previsto teoricamente, apresentava alguns obstáculos, dentre os quais podemos destacar a baixa tensão gerada, dificultando assim as medições dentro de um grau de precisão adequado. Com isso em mente e alinhado ao objetivo de aumentarmos a geração energética, os experimentos deram um passo à frente ao adotarmos os módulos Peltier.

Pastilha Peltier

O dispositivo de medição utilizado foi um módulo composto por 127 pares de lingotes de alto desempenho. O módulo foi projetado para operar com uma variação de temperatura de 70°C, com uma temperatura máxima em um dos lados de 100°C. As dimensões do módulo são 40mm de largura, 40mm de comprimento e 3,8mm de altura (Thermonamic Module. Datasheet: TEC112706). Os fios seguem o padrão de Bitola de Fio Americano (“*American Wire Gauge*” da sigla em inglês).

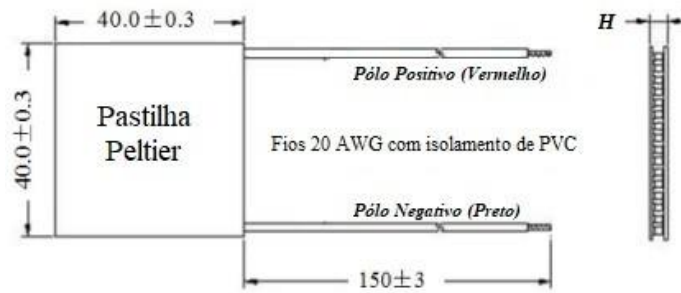


Figura 4. Características geométricas das pastilhas Peltier evidenciando o padrão AWG e o tipo de isolamento (PVC) dos fios.

Os materiais necessários para a montagem dos experimentos estão dispostos na tabela 1.

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

Tabela I. Materiais utilizados na produção dos protótipos de microgerador termielétrico e da mini geladeira.

Modelagem para análise do efeito Seebeck

No interior do sistema, o lado frio das placas Peltier, resfriado com água e gelo, está estrategicamente posicionado e um dissipador é utilizado para maximizar a captura dessa temperatura. Além disso, um pequeno motor foi instalado para manter a água em constante agitação, evitando a formação de uma camada de água mais quente na superfície, o que poderia reduzir a eficácia do resfriamento dos módulos termoeletrônicos (Ver fig. 5).

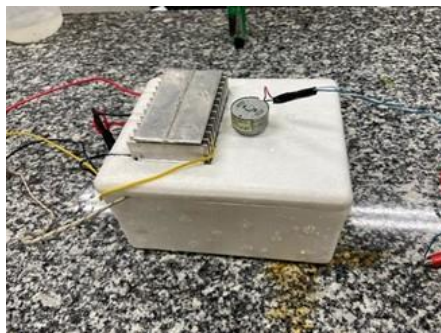


Figura 5. Esquema experimental de um microgerador termoeletrônico

Por outro lado, a face quente das placas é aquecida diretamente com uma chapa de metal acima do dissipador que, embora não seja possível garantir uma distribuição de calor perfeitamente uniforme na parte quente das placas, permite alcançar diferenças de temperaturas significativas, da ordem de 50°C ou mais, o que resultou em um aumento significativo da diferença de potencial elétrico obtida.

Modelagem para análise do efeito Peltier

A montagem do protótipo se deu de forma a posicionar os módulos termoelétricos com sua face fria acoplada a um dissipador de calor e um cooler voltados para o interior da caixa térmica e a face quente, também acoplada a um dissipador de calor e um cooler, posicionados para o exterior da caixa.

A fim de analisar a melhor configuração referente ao fluxo de ar dos coolers, foram realizados experimentos posicionando os coolers de diferentes formas tal que a direção da ventilação fosse ajustada para obter o melhor resultado possível. Dentre as possibilidades, aquela onde a direção da ventilação estava voltada na direção dos dissipadores foi a que mostrou maior eficiência na transferência de calor e, portanto, foi a utilizada em nosso protótipo.

Duas fontes de alimentação de corrente contínua foram utilizadas para alimentar os módulos e os coolers, e um multímetro foi acoplado ao sistema para garantir a leitura da ddp aplicada. Associada a esse esquema, foi introduzido um termômetro digital para aferir a leitura das temperaturas interna e externa à caixa térmica, como mostrado na figura 6.



Figura 6. Esquema experimental de uma mini geladeira

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Baseado em conceitos prévios tirados da literatura de materiais termoelétricos, analisamos o comportamento dos efeitos Seebeck e Peltier afim de averiguar a efetividade desses efeitos e comprovar seu poder de geração de eletricidade e de resfriamento a base de pastilhas de estado sólido, efeitos esses que possuem um enorme potencial de aplicabilidade em projetos de baixa tensão. Os dados apresentados a seguir foram coletados em uma sequência sistemática de experimentos cujo principal objeto é proporcionar uma alternativa viável de energia limpa.

Inicialmente analisamos o comportamento da geração termoelétrica com fios de diferentes materiais, com o objetivo de demonstrar didaticamente a ocorrência efeito Seebeck. Sabe-se que na junção de dois materiais, as cargas estão distribuídas uniformemente, porém ao aplicarmos calor em uma das junções e resfriarmos a outra, haverá um acúmulo de elétrons na junção quente gerando assim uma diferença de potencial e, conseqüentemente, uma corrente elétrica com o fluxo da parte quente para fria. (S.P. Beeby, Z. Cao – pg 306 – 328). Para tal observação, utilizamos fios de ferro e cobre de $0,73\text{mm}$ de espessura. Com uma única conexão, podemos perceber que a diferença de potencial obtida foi da ordem de décimos de milivolts e o coeficiente Seebeck encontrado foi de $0,0067\text{ mV/K}$, como podemos observar na figura 6, no entanto, ao aumentarmos o número de fios envolvidos e, conseqüentemente, o número de conexões (inset da Fig. 6) podemos perceber que há um aumento linear na produção energética. Neste caso ligamos os fios de forma a obtermos 6 junções e realizamos a leitura para uma diferença de temperatura de 98° em todas as medidas. Apesar da baixa geração, essas conexões com fios demonstraram inequivocamente a geração de eletricidade a partir de um gradiente de temperatura, além do fato de que o número de conexões é um fator crucial na geração termoelétrica. Este fato será notável ao utilizarmos as placas termoelétricas, nelas o grande número de conexões internas aumenta significativamente a diferença de potencial gerada.

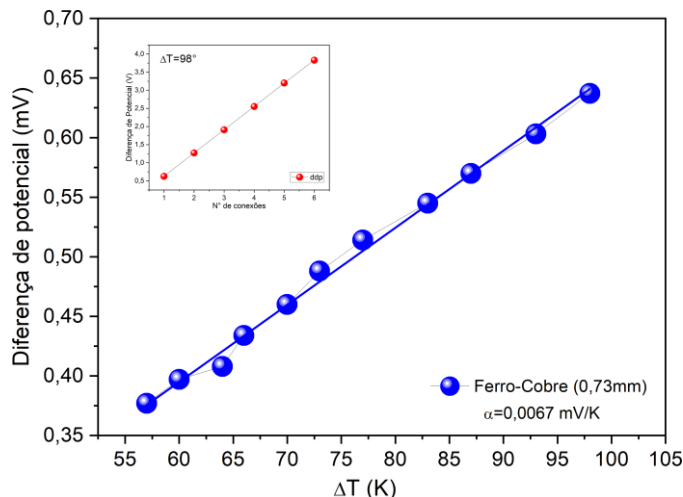


Figura 7. Diferença de potencial produzida por fios de Cobre e ferro ligados em conexões simples demonstrando o poder termoelétrico dessas junções.

Pode-se perceber na figura 7 a notável diferença de geração ao utilizarmos um módulo termoelétrico, o qual para uma pequena diferença de temperatura já é possível obter diferenças de potencial da ordem de milhares de vezes àquelas obtidas com fios. O enorme valor do coeficiente Seebeck encontrado a partir do ajuste linear dessa curva, de 126mV/K , evidencia o grande poder de geração desses módulos, alcançando 2,5 volts para um gradiente de temperatura de 40K. Como já era de se esperar, a corrente elétrica produzida também aumenta linearmente a medida que a ddp aumenta (inset da Fig. 7), podendo chegar 150mA para apenas 4K de diferença de temperatura.

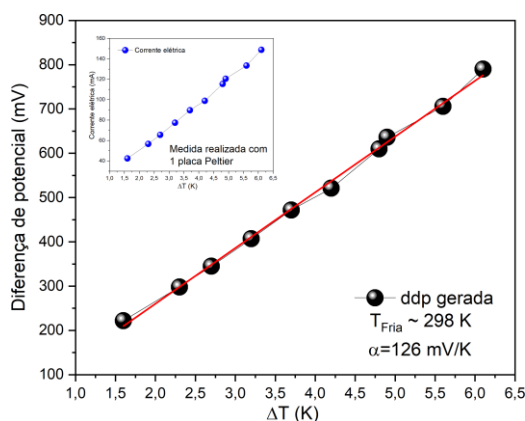


Figura 8. Diferença de potencial produzida por uma única placa Peltier utilizando baixos valores de diferença de temperatura.

Esse resultado torna evidente o potencial de aplicabilidade desses módulos termoelétricos.

Na sequência, o efeito Peltier observado em quatro módulos ligados termicamente em série demonstrou o poder em diminuir a temperatura interna de um sistema isolado

ao aplicarmos uma diferença de potencial. Na figura 7 é possível notar a queda abrupta na temperatura do sistema ao utilizarmos uma ddp de apenas 12 V aplicada eletricamente em paralelo com as placas. Aqui, há uma rápida estabilização da temperatura após um tempo de cerca de 20 minutos, demonstrando a eficácia desses módulos para pequenos projetos. Nosso protótipo consiste em uma caixa termicamente isolada de 3 litros com placas e dissipadores de calor posicionados nas partes interna e externa para melhorar o fluxo de calor. No gráfico é possível notar diferenças entre as diferentes medidas, isso se deu devido ao posicionamento dos coolers em relação aos dissipadores, pois a direção do fluxo de ar interfere diretamente na difusão do calor e, portanto, é fundamental para um bom desempenho dos módulos termoeletrônicos. O melhor resultado foi obtido direcionando os coolers externos e internos diretamente para os dissipadores de calor (dados pretos).

Outro fato notável nesses dados é a forma das curvas que, independentemente da configuração adotada, seguem um padrão exponencial, tendendo ao equilíbrio térmico quando a geração termoeletrica se iguala às perdas de calor por efeito Joule e condução térmica. Aqui, uma variação de temperatura de 11°C em apenas 15 minutos, aproximadamente, demonstra o potencial de aplicabilidade desses módulos termoeletrônicos para sistemas de resfriamento em pequenos volumes. Note que esses números podem ser ainda mais significativos se associarmos uma quantidade maior de módulos ou utilizarmos módulos mais potentes, visto que em nossas experiências foram usados módulos termoeletrônicos básicos de baixa potência.

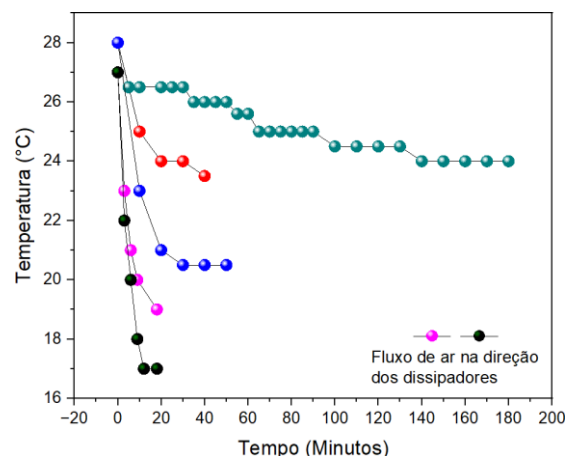


Figura 9. Dados referentes a diferentes medidas de acordo com a direção da ventilação dos coolers em relação aos trocadores de calor

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar das limitações dos efeitos termoelétricos de Seebeck e Peltier em aplicações de larga escala, como geração de energia massiva ou controle térmico em grandes intervalos de temperatura, os resultados obtidos evidenciam sua viabilidade em contextos específicos. No caso do efeito Seebeck, encontramos uma excelente correlação linear entre a diferença de temperatura aplicada e a diferença de potencial produzida, o qual tem enorme potencial de utilização em sistemas de geração de eletricidade de baixa potência. Já para o efeito inverso, os dados sugerem a necessidade de maiores investigações, no entanto, pode-se perceber claramente o quão rápido é a queda na temperatura do sistema ao utilizarmos tais módulos termoelétricos. Esse fato nos permite obter perspectivas de aplicações, como a utilização acoplado a dissipadores de calor para a obtenção de temperaturas reduzidas em sistemas de refrigeração de pequeno porte. Nossos resultados reforçam a relevância dos efeitos termoelétricos em aplicações emergentes, onde a eficiência energética e a miniaturização são fatores críticos.

Palavras-chave: Seebeck, Módulo Termoelétrico, Temperatura.

REFERÊNCIAS

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers. IPCC: 2023.

GOLDSMID, H. Julian et al. *Introduction to Thermoelectricity*, Vol.121, 1 ed, Springer, Berlin (2010).

S.P. Beeby, Z. Cao, A. Almussallam, *Kinetic, thermo electric and solar energy harvesting technologies for smart textiles*, in *Multidisciplinary KnowHow for SmartTextiles Developers*, ed. Tünde Kirstein, Woodhead Publishing, 2013, pp. 306 – 328.

FERNANDES, Jaiene Daniele FS et al. *Refrigeração utilizando pastilhas de efeito peltier*. HOLOS, v. 2, p. 2531, 2010.



PAGHI, C. Eduardo. *Aperfeiçoamento do anemômetro a efeito Peltier*.2002.102 p ág.(Instrumentação Eletrônica) UFSC, Florianópolis, 2002.

Thermonamic Module. Datasheet: TEC112706. Specification of Thermoelectric Module.