



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

QUANTIFICAÇÃO DA INCERTEZA DO COEFICIENTE DE PERFORMANCE DE UM REFRIGERADOR TERMOELÉTRICO

Caroline Maia de Souza, caroline.maia@ufvjm.edu.br¹
Monaline Aparecida Fernandes Chaves, monaline.chaves@ufvjm.edu.br¹
Rômulo Pierre Batista dos Reis, romulopierre@ufersa.edu.br²
José Ricardo Ferreira Oliveira, jose.ricardo@ufvjm.edu.br¹

¹ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Instituto de Ciência e Tecnologia. Rodovia MGT 367 – Km 583, nº 5000, Alto da Jacuba, Diamantina/MG, CEP 39100-000.

² Universidade Federal Rural do Semi Árido, Departamento de Engenharia e Tecnologia, Avenida Francisco Mota, nº 572, Mossoró/RN, CEP 59625-900.

Resumo. Os refrigeradores termoelétricos operam com base nos efeitos termoelétricos de Seebeck, Peltier e Thomson. Esses princípios correlacionam um determinado campo de temperatura a uma tensão elétrica. Os refrigeradores termoelétricos são amplamente utilizados devido à sua leveza, tamanho compacto e à ausência de fluidos refrigerantes. No entanto, é crucial avaliar e otimizar sua confiabilidade. O objetivo do estudo é quantificar as incertezas associadas ao desempenho desses dispositivos, identificando fontes de erro e contribuindo para a mitigação de falhas operacionais em consonância com a sustentabilidade ambiental. O trabalho é dividido em quatro etapas: análise energética, desenvolvimento de um modelo matemático para estimar o Coeficiente de Performance (COP), delineamento de uma bancada experimental e quantificação das incertezas usando o método de Monte Carlo. Os resultados indicam uma incerteza no COP do Refrigerador Termoelétrico abaixo de 1,0 %, com uma confiabilidade de 95,45 %. Essas descobertas fornecem insights valiosos para melhorar a eficiência e a confiabilidade dos refrigeradores termoelétricos, promovendo sua aplicação em um contexto de sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Efeito Peltier. Refrigeração. Função Densidade de Probabilidade. Método de Monte Carlo.

Abstract. Thermoelectric refrigerators operate based on the thermoelectric effects of Seebeck, Peltier, and Thomson. These principles correlate a certain temperature field to an electrical voltage. Thermoelectric refrigerators are widely used due to their lightness, compact size, and absence of refrigerant fluids. However, it is crucial to assess and optimize their reliability. The aim of the study is to quantify the uncertainties associated with the performance of these devices by identifying sources of error and contributing to the mitigation of operational failures in line with environmental sustainability. The work is divided into four stages: energy analysis, development of a mathematical model to estimate the Coefficient of Performance (COP), design of an experimental setup, and quantification of uncertainties using the Monte Carlo method. The results indicate an uncertainty in the COP of the Thermoelectric Refrigerator below 1,0 %, with a reliability of 95.45%. These findings provide valuable insights to enhance the efficiency and reliability of thermoelectric refrigerators, promoting their application in an environmental sustainability context.

Keywords: Peltier Effect. Refrigeration. Probability Density Function. Monte Carlo Method.

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia termoelétrica tem atraído muita atenção quando se trata de aplicações ligadas à geração de energia e refrigeração. Este tipo de tecnologia possui muitas vantagens, como ausência de peças móveis, ausência de vazamentos, silêncio e fácil manutenção, o que torna os dispositivos mais confiáveis e duráveis, com longa vida útil (Al-Shehri *et al.*, 2020). Um dispositivo termoelétrico é um componente de estado sólido sem partes móveis que pode converter uma fração do fluxo de calor recebido em um fluxo elétrico, enquanto elimina a porção não convertida do fluxo de calor para seu ambiente imediato em uma operação comumente chamada de geração termoelétrica (Henriquez-Vargas *et al.*, 2021). O princípio de funcionamento é governado pelos efeitos termoelétricos, principalmente *Seebeck*, *Peltier* e *Thomson*, que

correlacionam os fluxos acima mencionados à temperatura e aos campos elétricos (Henríquez-Vargas *et al.*, 2021; Guerra *et al.*, 2020). O efeito termoelétrico Peltier é o principal princípio de funcionamento para refrigeradores/bombas de calor termoelétricos. É esperada uma diferença de temperatura entre os lados frio e quente de um módulo termoelétrico sempre que uma corrente elétrica é aplicada (Venkatesan *et al.*, 2020). A Figura 1 ilustra um módulo termoelétrico típico.

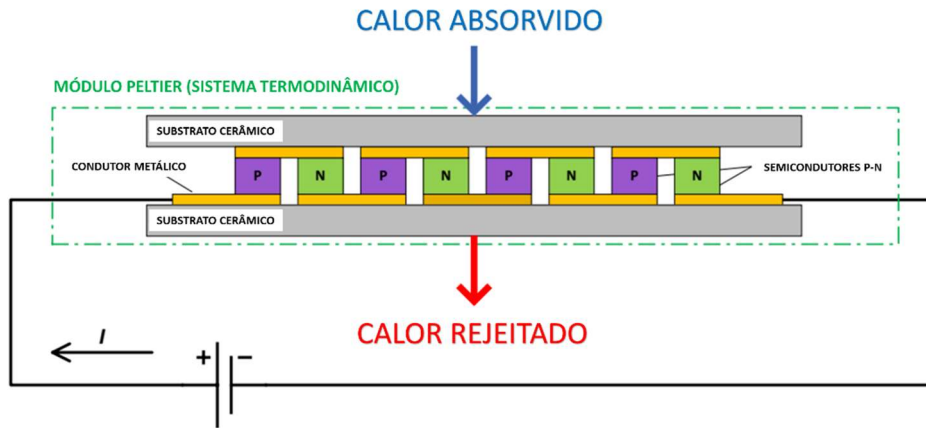


Figura 1. Modelo físico do problema proposto (adaptado de Reis *et al.*, 2021).

Um Módulo Termoelétrico Peltier (PTM) típico consiste em vários pares de colunas semicondutoras do tipo P – N, conectadas termicamente em paralelo e eletricamente em série para aumentar a tensão operacional do módulo. As colunas semicondutoras do tipo P – N são interligadas com bons condutores elétricos, como o cobre. Os condutores devem estar isolados eletricamente do dispositivo que está sendo resfriado; caso contrário, o módulo entrará em curto-circuito elétrico com a superfície que está sendo resfriada. Contudo, o material de isolamento elétrico também deve ser um material termicamente condutor para minimizar a diferença de temperatura entre o condutor e o dispositivo que está sendo resfriado.

Em uma aplicação de baixa tensão CC, uma face do módulo fica mais fria, enquanto há um aumento de temperatura no outro lado (efeito termoelétrico Peltier). Em outras palavras, uma certa quantidade de calor é absorvida de uma determinada fonte no lado frio do PTM. Entretanto, o calor é rejeitado do lado quente para um dissipador, através da realização de trabalho elétrico a partir da vizinhança no PTM (princípio termodinâmico de uma bomba de calor). Em geral, o quantum de calor rejeitado é sempre predominante (maior) em comparação com o calor absorvido, o que se deve ao facto de o primeiro englobar o aquecimento de Joule, além do calor absorvido pelo módulo (Venkatesan *et al.*, 2020).

Os refrigeradores termoelétricos são amplamente utilizados em coolers para computadores, mini refrigeradores portáteis, condicionadores de ar automotivos e bebedouros domésticos por serem dispositivos leves, compactos e por não utilizarem fluidos refrigerantes para ciclo frigorífico. Assim, é importante otimizar a confiabilidade destes dispositivos quando da sua utilização. Neste sentido, o objetivo geral deste trabalho é quantificar a incerteza através do Método de Monte Carlo do Coeficiente de Performance (COP) de um refrigerador termoelétrico, que trabalha segundo o princípio de Peltier. De modo específico, este trabalho visa: a) desenvolver planilha eletrônica para quantificar a incerteza de medição através do Método de Monte Carlo; b) realizar o balanço de energia do refrigerador termoelétrico; c) obter uma expressão para o COP.

2. MÉTODOS

2.1 Modelo Matemático

As variáveis de interesse do problema foram estabelecidas através do balanço de energia do sistema termodinâmico (ver Fig. 1). O modelo matemático utilizado para estimativa do COP é dado pela expressão:

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}} = \frac{[(m \times c_p \times \Delta T) \div \Delta t]}{V \times I} \quad (1)$$

Onde m , c_p e ΔT são, respectivamente, a massa, o calor específico e a variação de temperatura do meio refrigerado; o produto entre V (tensão elétrica) e I (corrente elétrica) consiste na potência elétrica fornecida ao refrigerador termoelétrico; o tempo de atuação da fonte de potência elétrica é dado por Δt .

2.2 Montagem Experimental

A Figura 2 apresenta um diagrama esquemático da bancada experimental utilizada neste trabalho.

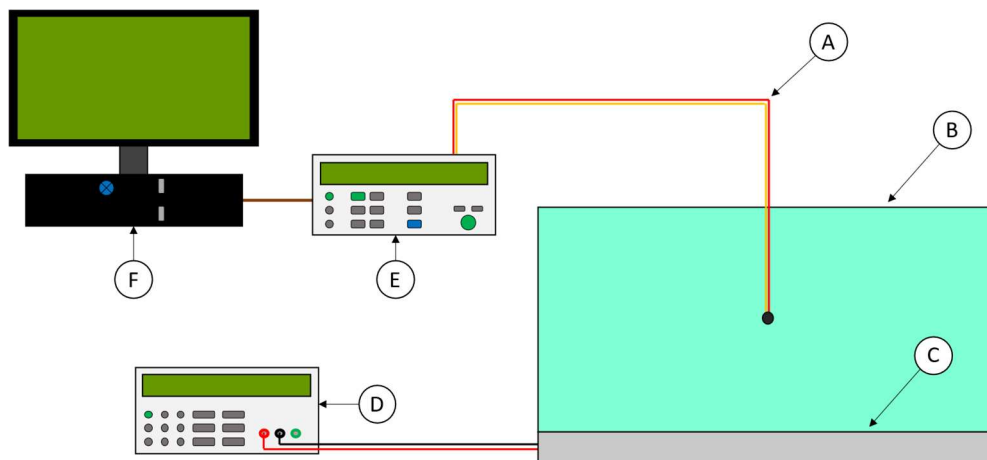


Figura 2. Bancada experimental: A) Termopar tipo K, B) Recipiente com água, C) Refrigerador Termoeletrico ou Dispositivo de Peltier, D) Fonte de Potência, E) Sistema de Aquisição de Dados, F) Hardware.

Um recipiente metálico com 1 kg de água foi posicionado na face fria do dispositivo de Peltier. Uma fonte elétrica de corrente contínua fornece uma potência 60 W para o refrigerador termoeletrico. Dessa forma, a massa é resfriada durante 60 s. Um termopar do tipo K é posicionado no interior do recipiente para medir a variação de temperatura média da água. O procedimento foi repetido 40 vezes, para que os dados experimentais sejam normalmente distribuídos.

2.3 Quantificação da Incerteza

Neste estudo, a quantificação da incerteza foi realizada usando o Método de Monte Carlo (MCM), proposto no JCGM 101 (2008). O MCM é teoricamente bem fundamentado na lei dos grandes números e no teorema do limite central, ambos aplicáveis em procedimentos de medição realistas (Wang *et al.*, 2016). Quando aplicado para avaliar incertezas, o MCM utiliza simulações computacionais, onde as *Funções de Densidade de Probabilidade* (PDF) das variáveis de entrada são propagadas através do modelo matemático de medição, resultando na PDF da variável de saída (Ferreira-Oliveira *et al.*, 2020). Assim, ele parte de um modelo matemático que descreve a medida das variáveis de entrada e suas informações estatísticas. A propagação das PDFs, através do modelo adotado, é ilustrada na Figura 3.

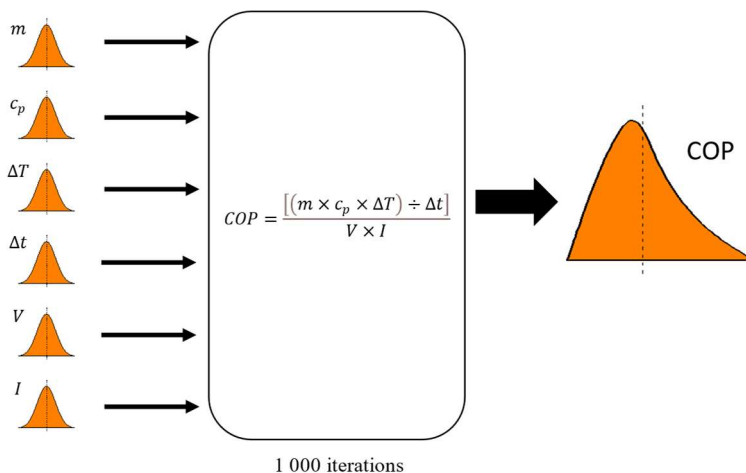


Figura 3. Propagação de funções densidade de probabilidade.

A PDF da variável de saída foi obtida a partir de 1.000 iterações. Essas iterações foram realizadas usando o software Microsoft Excel® 2010, e o processador Intel Core® i7 foi usado como plataforma de hardware para a avaliação. Se a PDF de saída mostrar uma assimetria (SK) e curtose (KT) próximas de zero e três, respectivamente, ela pode ser considerada uma PDF gaussiana. Portanto, considerando uma probabilidade de cobertura de 95,45 %, a incerteza

expandida (U) da variável de saída será igual ao dobro (fator de cobertura $k = 2$) do desvio padrão apresentado pela PDF para esta variável.

O fator de abrangência k é determinado como uma função do nível de confiança especificado para o intervalo. Quando o número de medições para quantificar a incerteza de uma variável é menor que 30, o Teorema do Limite Central deve ser usado juntamente com as tabelas *t-Student*. Dessa forma, o valor de k será baseado no grau efetivo de liberdade da medição da incerteza. No entanto, quando o número de medições é maior que 30, como é o caso no presente trabalho, a quantidade é descrita por uma Função de Densidade de Probabilidade (PDF) Normal. Portanto, para uma variável Z , descrita por uma PDF Normal, com média μ_z e desvio padrão σ_z , o intervalo $\mu_z \pm \sigma_z$ cobre 68,27 %, 95,45 % e 99,73 % da distribuição para $k = 1, 2$ e 3, respectivamente. No presente trabalho, $k = 2$ foi adotado, implicando, portanto, uma probabilidade de cobertura de 95,45 %.

3. RESULTADOS

A Figura 4 apresenta o histograma com os resultados obtidos pela simulação de Monte Carlo, com 1000 iterações.

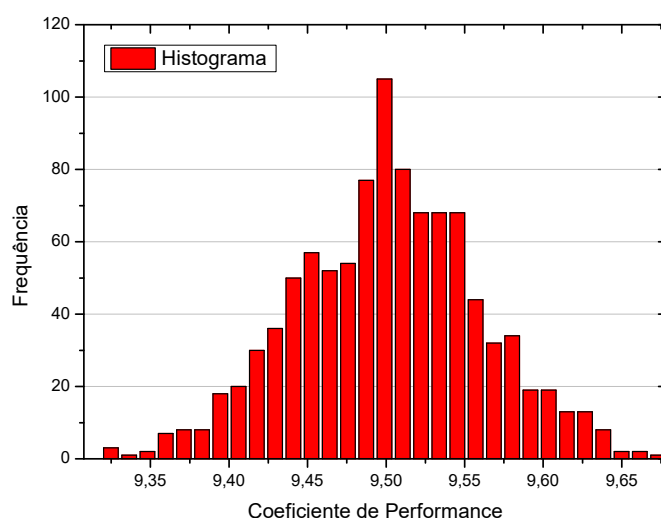


Figura 4. Histograma do COP obtido pela simulação de Monte Carlo.

A incerteza do Coeficiente de Performance do Refrigerador Termoelétrico foi inferior à 1,0 %, para um fator de abrangência igual a 2 e confiabilidade de 95,45 %.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi avaliada a incerteza de medição do Coeficiente de Performance de um refrigerador termoelétrico. O problema físico foi resolvido através do balanço de energia do sistema. O Método de Monte Carlo foram aplicados para calcular a incerteza das medições realizadas. As seguintes conclusões podem ser tiradas deste artigo. A incerteza de medição mostra que houve uma baixa dispersão nas medições de temperatura realizadas pelo termopar do tipo K. Os resultados obtidos neste caso são distribuídos normalmente e a dispersão da temperatura obtida está de acordo com a literatura (Reis *et al.*, 2021). Pode-se afirmar que os resultados satisfatórios obtidos refletem certos cuidados tomados na preparação e durante os procedimentos experimentais, a calibração dos termopares e a realização de uma quantidade adequada de experimentos, de modo a obter uma distribuição normal das medições de temperatura. Esses fatores foram cruciais para garantir a qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos neste trabalho.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Os autores também gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro concedido através da Chamada 13/2023 - Participação Coletiva em Eventos de Caráter Técnico-Científico no País.

6. REFERÊNCIAS

- Al-Shehri, S. and Saber, H.H., 2020. “Experimental investigation of using thermoelectric cooling for computer chips”. *J. King Saud Univ. Eng. Sci.*, Vol. 32, Issue 5, p. 321-329.
- Dos Reis, R.P.B., Ferreira-Oliveira, J.R., Grassi, E.N.D. et al., 2022. “Measurement of Phase Transformation Temperatures in Shape Memory Alloys Using a Peltier Thermoelectric Apparatus”. *Int J Thermophys.*, Vol. 43, p. 50.
- Ferreira-Oliveira, J.R., De Lucena, L.R.R., Dos Reis, R.P.B., De Araújo, C.J., Bezerra-Filho, C.R., Arencibia, R.V., 2020. “Uncertainty Quantification Through use of the Monte Carlo Method in a One-Dimensional Heat Conduction Experiment”. *Int. J. Thermophys.*, Vol. 41, p. 40.
- Guerra, V., Ticay-Rivas, J.R., Alonso-Eugenio, V., Perez-Jimenez, R., 2020. “Characterization and Performance of a Thermal Camera Communication System”. *Sensors*, Vol. 20, p. 3288.
- Henríquez-Vargas, L., Reyes, A., Quiroga, M., Angel, F., Pailahueque, N., Donoso-García, P., 2021. “Thermoelectric generation in a PCM-based energy accumulator”. *Heat Mass Transfer*, Vol. 57, p. 1265–1274.
- JCGM 101 (2008) Evaluation of Measurement Data—Supplement 1 to the guide to the expression of uncertainty in measurement—propagation of distributions using a Monte Carlo Method, 1st edn. Joint Committee for Guides in Metrology, BIPM, Paris
- Kishore, R.A., Nozariasbmarz, A., Poudel, B., Sanghadasa, M., Priya, S., 2019. “Ultra-high performance wearable thermoelectric coolers with less materials”, *Nat. Commun.*, Vol. 10., p. 1765.
- Venkatesan, K., Venkataramanan, M., 2020. “Experimental and Simulation Studies on Thermoelectric Cooler: A Performance Study Approach”. *Int. J. Thermophys.*, Vol. 41, p. 38. <https://doi.org/10.1007/s10765-020-2613-2>
- Wang, C., Qiu, Z., Yang, Y., 2016. “Uncertainty propagation of heat conduction problem with multiple random inputs”. *Int J Heat Mass Transfer*, Vol. 99, p. 95-101.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.