

## **AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DE OPERAÇÃO DE TERMOSSIFÕES APLICADOS EM COLETORES SOLARES UTILIZANDO NANOFLUIDO DE ÓXIDO DE GRAFENO**

**Victor Vaurek Dimbarre, victordimbarre@alunos.utfpr.edu.br<sup>1</sup>**  
**Guilherme Antonio Bartmeyer, gabartmeyer@hotmail.com<sup>1</sup>**  
**Pedro Leineker Ochoski Machado, pedmac@alunos.utfpr.edu.br<sup>1</sup>**  
**Rozane de Fátima Turchiello Gómez, turchiel@utfpr.edu.br<sup>2</sup>**  
**Paulo Henrique Dias dos Santos, psantos@utfpr.edu.br<sup>3</sup>**  
**Thiago Antonini Alves, antonini@utfpr.edu.br<sup>1</sup>**

<sup>1,2</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Mecânica<sup>1</sup>, Departamento Acadêmico de Física<sup>2</sup>, Rua Doutor Washington Subtil Chueire, 330, Jardim Carvalho, CEP 84.017-220, Ponta Grossa/PR, Brasil.

<sup>3</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Mecânica, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000, Ecoville, CEP 81.280-340, Curitiba/PR, Brasil.

**Resumo:** *Os termossifões são dispositivos passivos de transferência de calor assistidos pela gravidade operando em ciclo bifásico. Eles são capazes de transferir grandes quantidades de calor com pequenos gradientes de temperatura. Sendo comumente usados em coletores solares a vácuo de alta pressão, com o objetivo de melhorar a eficiência térmica desses trocadores de calor. São compostos por três partes, o evaporador, responsável pela absorção do calor e transferir, ao fluido de trabalho para que ele evapore e por diferença de pressão ascenda ao evaporador; o condensador, responsável por trocar calor com o fluido de arrefecimento para que o fluido de trabalho possa condensar e retornar ao evaporador; e por fim, a seção adiabática. Este trabalho, tem por objetivo avaliar experimentalmente a eficiência térmica de termossifões utilizando nanofluido de óxido de grafeno, na concentração de 5%, sob diferentes inclinações e aplicando diferentes cargas térmicas (35W, 55W e 75W). Os termossifões foram construídos com comprimento do evaporador de 1600mm, 40mm de seção adiabática e 35mm de condensador, usando um tubo de cobre de 1/4" de diâmetro externo. Concluiu-se que para as diferentes cargas térmicas aplicadas a inclinação de trabalho de 35° apresentou a menor resistência térmica, tornando-se a mais eficiente nas condições testadas.*

**Palavras-chave:** *Termossifão. Nanofluido. Óxido de Grafeno. Coletores Solares. Desempenho Térmico.*

**Abstract.** *Thermosyphons are passive gravity-assisted heat transfer devices operating in a two-phase cycle. They are able to transfer large amounts of heat with small temperature gradients. They are commonly used in high-pressure vacuum solar collectors, with the aim of improving the thermal efficiency of these heat exchangers. They are composed of three parts, the evaporator, responsible for absorbing heat and transferring, to the working fluid so that it evaporates and by pressure difference rises to the evaporator; the condenser, responsible for exchanging heat with the cooling fluid so that the working fluid can condense and return to the evaporator; and finally, the adiabatic section. This work aims to experimentally evaluate the thermal efficiency of thermosyphons using graphene oxide nanofluid, at a concentration of 5%, under different slopes and applying different thermal loads (35, 55, and 75W). Thermosyphons were constructed with an evaporator length of 1600mm, 40mm of adiabatic section and 35mm of condenser, from a copper tube of 1/4" of outer diameter. It was concluded that for the different thermal loads applied the working slope of 35° presented the lowest thermal resistance, becoming the most efficient in the tested conditions.*

**Keywords:** *thermosyphon, nanofluid, graphene oxide, solar collectors, thermal performance.*

### **1. INTRODUÇÃO**

A utilização de fontes de energia renováveis é uma temática amplamente abordada, pois é considerada limpa e inesgotável, e tem sido alvo de estudos que buscam novas formas de utilização, bem como a implementação de aperfeiçoamentos buscando maior eficiência ou maneiras diferentes de captá-la e armazená-la. Dentre as técnicas de

conversão de energia, destacam-se os painéis fotovoltaicos, que transformam a radiação solar em energia elétrica podendo ser armazenada em baterias, e os coletores solares, que transferem a energia térmica podendo ser utilizados para o aquecimento de água de piscinas e uso residencial. (Tessaro et al, 2006)

Os coletores solares são dispositivos compostos por uma placa absorvedora, que tem por função a absorção da radiação solar, sendo ela de diferentes formas, entre elas, a do tipo concentradora, que possuem uma superfície refletora, que direciona a radiação direta a um foco, e a do tipo não concentradora, que possuem área de abertura igual, ou seja, área de interceptação é mesma que a área de absorção de radiação, e são aplicadas em sistemas que possuem baixa temperatura operacional. Os tipos de coletores solares que mais se destacam são: o placa plana e o coletor solar de tubo evacuado assistido por termossifões. Eles se diferenciam pela forma de transferência de energia, no placa plana a irradiação solar incide diretamente no dispositivo por onde tem o escoamento do fluido a ser aquecido, já no coletor solar de tubo evacuado conta com uma estrutura interna denominada termossifão que aquece e transfere o calor para o fluido a ser aquecido, sendo que esse tem sem mostrado uma alternativa mais eficiente para o aquecimento de água para usuários domésticos (Kalagirou, 2009; Espírito Santo, 2017).

Os termossifões ou tubos de calor assistidos pela gravidade, são dispositivos que possuem elevada condutividade térmica e operam em um ciclo bifásico, no qual há conversão do fluido de trabalho de líquido para vapor e vice-versa. Para isso, ele pode se dividir em três regiões, cada qual com uma função específica, sendo elas denominadas de evaporador, seção adiabática e condensador. O evaporador se localiza na parte inferior do termossifão e é caracterizado pela absorção de calor de uma fonte externa, calor esse que é responsável pela evaporação do fluido de trabalho e faz com que o vapor gerado se mova para a região mais fria, devido a diferença de pressão, localizada na parte superior que é denominada condensador. Nesta seção ocorre a condensação do fluido de trabalho devido a dissipação do calor absorvido e com isso, o fluido de trabalho já na fase líquida e com o auxílio da gravidade, retorna ao evaporador. A seção adiabática se localiza entre o condensador e o evaporador, e se caracteriza por não haver trocas térmicas entre o termossifão e o ambiente externo (Reay *et al.*, 2014; Mantelli, 2021).

Para a construção do termossifão deve-se avaliar o invólucro e o fluido de trabalho a ser utilizado. O invólucro é responsável por isolar o fluido de trabalho das condições externas, sendo assim ele deve ser a prova de vazamentos, mantendo a diferença presente entre o ambiente interno e o externo, e permitindo que haja transferência de calor entre o fluido de trabalho e o meio, sendo que para a escolha desse invólucro devem ser observadas propriedades como condutividade térmica, porosidade, molhabilidade, ductibilidade, entre outras. Já o fluido de trabalho requer atenção por influenciar diretamente na funcionalidade do dispositivo, sendo que se deve observar: a faixa de temperatura de operação, pressão de vapor, estabilidade, toxicidade, condutividade térmica e a compatibilidade química entre o fluido de trabalho e o material do invólucro do termossifão (Peterson, 1994; Zohuri, 2016).

Dentre os diferentes fluidos de trabalho, o que vem ganhando maior destaque são os nanofluidos, pois tem apresentado maior eficiência térmica e melhora nas características termofísicas quando comparados à seus fluidos-base, e esse aumento é relacionado na literatura à fatores como, um menor tamanho e quantidade de bolhas produzidas no evaporador, e a melhora na condutividade térmica do fluido de trabalho, como por exemplo o nanofluido de óxido de grafeno (Herrera *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a proposta do trabalho baseou-se na utilização de nanofluido de óxido de grafeno na concentração de 5% para ser utilizados em termossifões, que são utilizados em coletores solares de tubos à vácuo visando avaliar a resistência térmica sob diferentes inclinações de trabalho.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A construção do termossifão foi baseada em duas etapas, a primeira foi a fabricação do condensador, onde foi utilizado uma barra de cobre ASTM B75 sendo usinada e ficando com as dimensões finais 35mm de comprimento e 13mm de diâmetro interno, juntamente com uma peça de adaptação entre os diâmetros de 13mm e 6,15mm e tampas dos mesmos diâmetros para fazer o fechamento do termossifão. A segunda etapa foi a união entre as peças usinadas e um tubo de cobre de diâmetro 1/4" sem costura com um comprimento total de 1640mm, onde 1600mm são correspondentes ao evaporador e 40mm a seção adiabática.

### 2.1. Procedimento e Aparato experimental

Para realizar a união dos componentes utilizou a metodologia presente em Antonini Alves *et al.* (2018), referente à preparação, limpeza montagem, teste de estanqueidade, procedimento de evacuação e preenchimento com o fluido de trabalho.

O fornecimento de energia para o evaporador foi através da dissipação de potência elétrica da fonte de potência em uma fita resistiva através do efeito Joule, fornecendo as cargas térmicas de 35W, 55W e 75W. Para o resfriamento do condensador, um escoamento de água de 0,75L/min à 18,0°C ± 0,5°C fornecido por um banho ultratermostatizado, com o objetivo de dissipar o calor absorvido pelo termossifão. A referência para a inclinação foi a latitude da cidade de Ponta Grossa/PR/BR que é de 25°05'42" Sul e por isso as inclinações de teste estabelecidas foram as de 17°, 25° e 35°.

O aparato experimental utilizado nesse estudo, mostrado na Figura 1, é composto por uma fonte de alimentação *Politerm™16E*, um sistema de aquisição de dados *Agilent™ 34970A* com um multiplexador de 20 canais, um banho ultratermostatizado *Solab™ SL-130*, um *notebook Dell™*, um *nobreak NHS™* e um medidor de vazão de área variável *Omega Engineering™ FL-2051* com válvula reguladora.

As regiões do evaporador e da seção adiabática foram cobertas com fita *Kapton™* de alta condutividade térmica e baixa condutividade elétrica. Uma fita resistiva metálica foi enrolada sobre o evaporador e conectada à fonte de potência a partir de cabos banana-jacaré. Um total de 10 termopares do tipo K *Omega Engineering™* foram responsáveis pela aquisição de dados de temperatura durante os testes experimentais, sendo que 6 termopares foram distribuídos equidistantes ao longo do comprimento do evaporador, 1 localizado na região do evaporador, outro na região do condensador e, por fim, um avaliando a temperatura de entrada do fluido de arrefecimento na região do condensador e outro a temperatura de saída.

Para avaliar o desempenho de um termossifão pode-se utilizar o conceito de resistência térmica global ( $R_{th}$ ), que pode ser entendida como a facilidade a qual o termossifão tem em transportar a energia na forma de calor, sendo expressa pela Eq. (1):

$$R_{th} = \frac{T_{evap} - T_{cond}}{q_{in}}, \quad (1)$$

sendo que,  $T_{evap}$  é a temperatura média do evaporador,  $T_{cond}$  é a temperatura média do condensador e  $q_{in}$  é a carga térmica aplicada no termossifão.

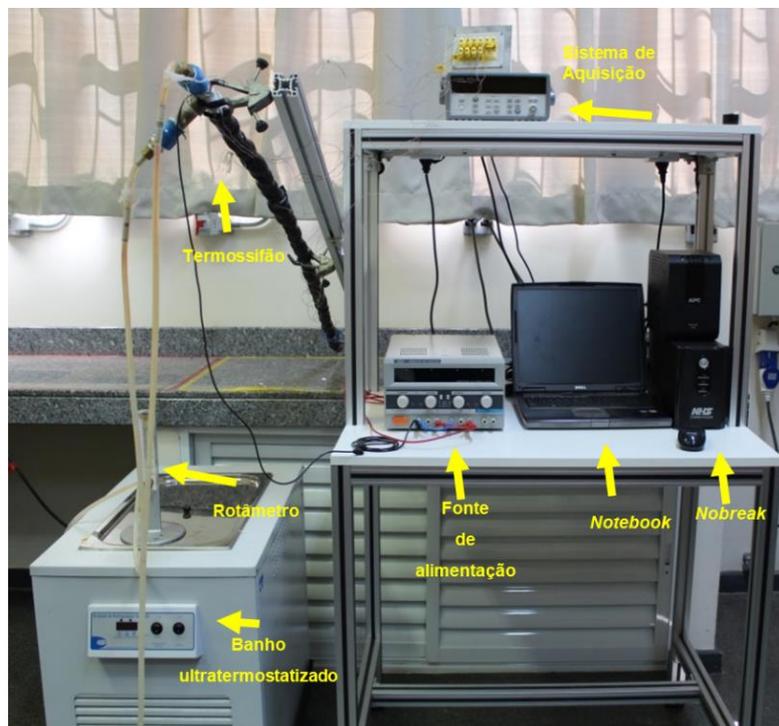


Figura 1. Aparato experimental

## 2.2. Análise de incertezas

Durante o processo de execução de medidas experimentais fez-se necessário avaliar as incertezas das medições, e tal análise foi realizada com o auxílio do *software EES™ (Engineering Equation Solver™)*, que considera o Método de Propagação de Incertezas descrito em Taylor & Kuyatt (1994), na Nota Técnica NIST 1297 (Instituto Nacional de Normas e Tecnologia, do inglês, *National Institute of Standards and Technology*), intitulada “*Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*”, ou em português, “*Diretrizes para Avaliar e Expressar a Incerteza dos Resultados da Medição INNT*”, sendo expressa na Eq. (2):

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2}. \quad (2)$$

Dados os instrumentos utilizados e com o auxílio de fichas técnicas e catálogos fornecidos por fabricantes, foi construído a Tabela 1, na qual estão presentes os valores de incertezas para dados instrumentos.

Tabela 1. Incertezas experimentais.

VARIÁVEL	INSTRUMENTO	INCERTEZA	UNIDADE
Temperatura	Termopar do Tipo K	$\pm 1,27$	$^{\circ}\text{C}$
Diâmetro	Paquímetro	$\pm 0,25$	mm
Comprimento	Escala Milimetrada	$\pm 0,50$	mm
Vazão	Rotâmetro	$\pm 0,05$	L/min
Potência	Fonte de Potência	$\pm 1\%$	W

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 2, 3 e 4 mostram as distribuições da temperatura em função do tempo para cada um dos casos a serem avaliados ( $17^{\circ}$ ,  $25^{\circ}$  e  $35^{\circ}$ ). As linhas pontilhadas, denominadas  $T_{in}$  e  $T_{out}$ , representam os termopares que avaliaram as temperaturas de entrada e saída, respectivamente, no condensador. Os termopares do condensador e da região adiabática são representados por linhas traço e traço-ponto, respectivamente. Por fim, os termopares localizados no evaporador, denominados  $T_{evap}$ , com numeração de 1 a 6, são representados por linhas coloridas cheias.

Nota-se que ao aplicar uma carga térmica inicial há uma instabilidade em todos os termossifões no início de sua operação e isso deve-se ao efeito de *geyser boiling* (Mantelli, 2021) e, pode-se notar também, que o termossifão com inclinação de  $17^{\circ}$  apresenta maior temperatura média do evaporador para todas as cargas térmicas aplicadas.

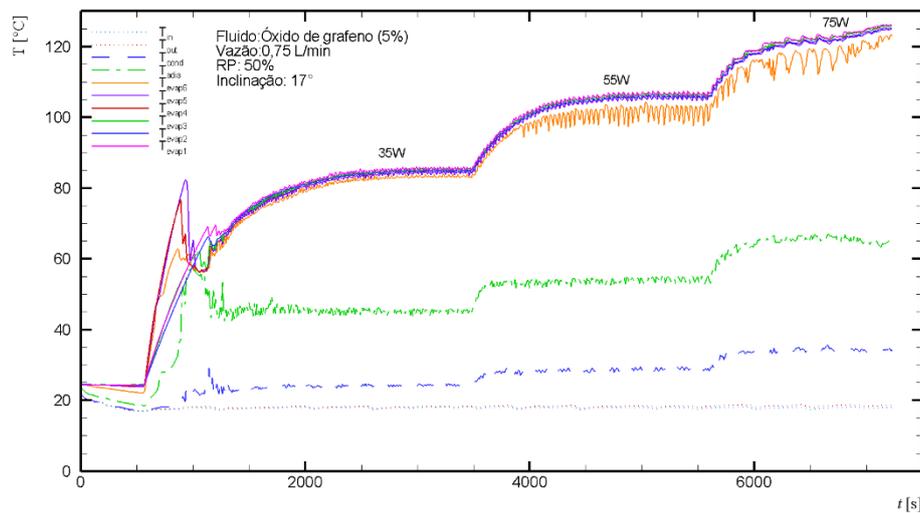


Figura 2. Distribuição de temperaturas em função do tempo para inclinação de  $17^{\circ}$ .

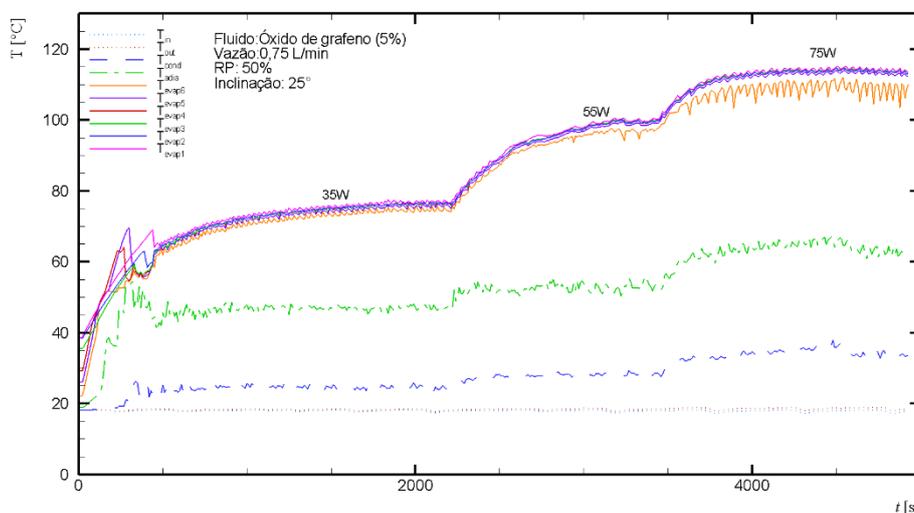


Figura 3. Distribuição de temperaturas em função do tempo para inclinação de  $25^{\circ}$ .

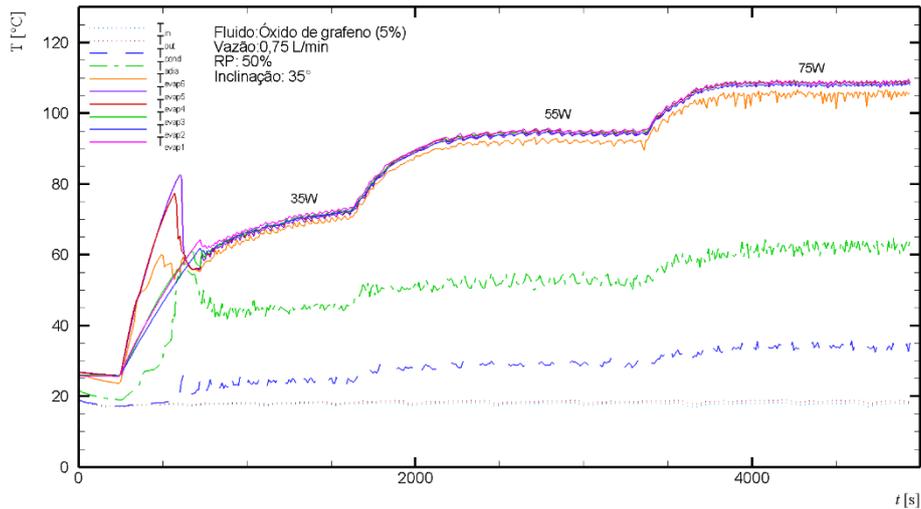


Figura 4. Distribuição de temperaturas em função do tempo para inclinação de 35°.

A Figura 5 mostra os resultados da Eq. (1) para as diferentes inclinações testadas em função das cargas térmicas aplicadas e é possível concluir, que primeiro, em todos os casos testados foi possível identificar o comportamento esperado, conforme há o aumento da carga térmica aplicada há uma redução da carga térmica em função do menor gradiente apresentado entre as regiões do condensador e do evaporador. Segundo que o termosifão que apresentou, em todos os casos, a menor resistência térmica foi o termosifão testado à 35° e isso se deve ao fato de serem dispositivos assistidos pela gravidade, havendo uma maior componente da força gravitacional decomposta nessa angulação é facilitado o retorno do fluido de trabalho na fase líquida para o condensador.

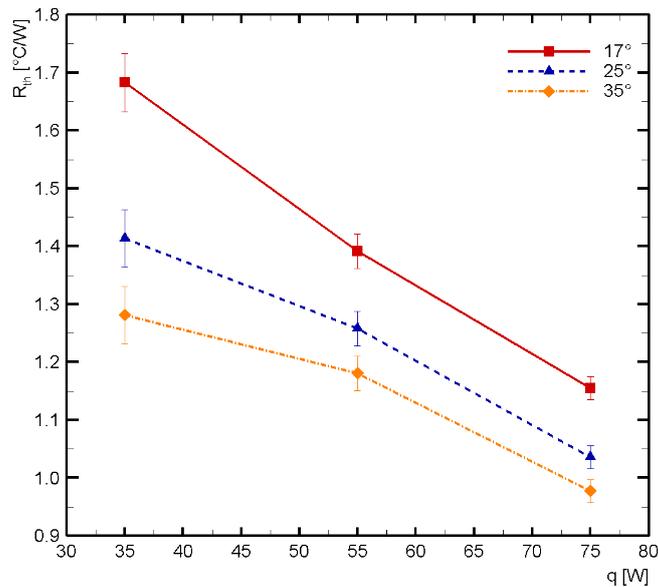


Figura 5. Resistência térmica em função da carga térmica aplicada.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste estudo foi realizada uma análise experimental da influência da inclinação de termosifões aplicados a coletores solares de tubo evacuado de alta pressão, na qual foi simulado através da conversão de energia elétrica em energia térmica por meio do efeito Joule, em uma fita resistiva localizada do evaporador de um termosifão, a aplicação de cargas térmicas que em casos reais é realizada pela irradiação solar. A análise térmica de tal dispositivo foi baseada na distribuição de temperatura ao longo do tempo quando aplicadas diferentes cargas térmicas e calculada qual a resistência térmica correspondente. Os resultados mostraram que para a inclinação de 35° foram obtidos os menores valores de resistência térmica em todos os casos sendo justificado pelo fato do termosifão em sua definição ter o aspecto de ser um dispositivo passivo assistido pela gravidade e com isso, nesse caso, quanto maior a inclinação maior é a componente da gravidade decomposta que auxilia no retorno do fluido condensado.

## 5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são prestados à CAPES, à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UTFPR, à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e ao Departamento Acadêmico de Mecânica da UTFPR/Campus Ponta Grossa.

## 6. REFERÊNCIAS

- Antonini Alves, T., Krambeck, L., Santos, P.H.D., 2018. Heat pipe and thermosyphon for thermal management of thermoelectric cooling. In: Aranguren, P. (Org.). Bringing thermoelectricity into reality. London, UK: InTech.
- Espírito Santo, M., Análise Experimental de Diferentes Configurações de Termossifões para Aplicação em Coletor Solar, 2017. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa.
- Herrera, B., Gallego, A., Cagua, K., 2021. Experimental evaluation of a thermosyphon-based heat exchanger working with a graphene oxide (GO) nanofluid in a cogeneration system. *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 24, 100949.
- Kalogirou, S. A., 2009. “Solar energy engineering: processes and systems”. Academic Press, Elsevier, EUA.
- Mantelli, M.B.H., 2021. “Thermosyphons and heat pipes: theory and applications”. Springer Nature, Switzerland.
- Peterson, G. P., 1994. “An introduction to heat pipes: modeling, testing and application”. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Reay, D.A., Kew, P.A., McGlen, R.J., 2014. “Heat pipe: theory, design and applications”. Butterworth-Heinemann, United Kingdom.
- Tessaro, A.R., Souza, S.N.M., Ricieri, R.P., 2006. Desempenho de um painel fotovoltaico acoplado a um rastreador solar. In: *Encontro de Energia no Meio Rural*, Campinas, Brasil.
- Zohuri, B., 2016. “Heat pipe design and technology: modern applications for practical thermal management”. Springer Nature, Switzerland.

## 7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.