

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE TERMOSSIFÕES CONTENDO NANOFUIDO DE ÓXIDO DE GRAFENO APLICADOS NO RESFRIAMENTO DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

Data de aceite: 01/07/2024

Humberto Ianczkovski

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica - Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/
Ponta Grossa)

Allefe Jardel Chagas Vaz

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica - Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/
Ponta Grossa)

Victor Vaurek Dimbarre

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica - Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/
Ponta Grossa)

Rozane de Fátima Turchiello Gómez

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica - Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/
Ponta Grossa)

Thiago Antonini Alves

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica - Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/
Ponta Grossa)

RESUMO: Termossifões são dispositivos passivos capazes de transferir grandes quantidades de calor, por meio do calor latente de vaporização de um fluido de trabalho. Os nanofluidos apresentam-se como uma nova geração de meios de transferência de calor, em função do aprimoramento de propriedades termofísicas. Em razão dessas circunstâncias, no presente trabalho, foi executada uma investigação experimental do desempenho térmico de termossifões utilizando nanofluido de óxido de grafeno, em concentrações volumétricas de 5,0% e 2,5%, como fluido de trabalho. Quanto às características geométricas dos invólucros, os mesmos foram construídos em cobre, com diâmetro externo de 9,45mm, diâmetro interno de 7,75mm e comprimento total de 200mm. Os testes experimentais foram realizados em duas inclinações diferentes (45° e 90° em relação à horizontal) sob cargas térmicas de 5W a 45 W e com convecção forçada no condensador. Os resultados demonstraram que a utilização do nanofluidos óxido de grafeno reduziu consideravelmente a resistência térmica e a temperatura de operação do termossifão, em comparação à utilização de água destilada como fluido de trabalho, além disso, a concentração volumétrica de 2,5% apresentou os resultados otimizados entre os fluidos de trabalho analisados.

PALAVRAS-CHAVE: termosifão, nanofluido, óxido de grafeno, experimental.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMOSYPHONS CONTAINING GRAPHENE OXIDE NANOFUID APPLIED IN THE COOLING OF ELECTRONIC EQUIPMENT

ABSTRACT: Thermosyphons are passive devices able to transfer large amounts of heat through the latent heat of vaporization of a working fluid. Nanofluids are presented as a new generation of heat transfer fluids due to the improvement of thermophysical properties. Given these circumstances, in the present article, an experimental analysis of the thermal performance of thermosyphons was performed using graphene oxide nanofluid, in volumetric concentrations of 5.0% and 2.5%, as working fluid. For the geometric characteristics of the enclosures, they were built in copper, with an outer diameter of 9.45mm, an inner diameter of 7.75mm, and a total length of 200mm. The experimental tests were done at two different inclinations (45 and 90° in relation to the horizontal), under thermal loads from 5 to 45W and with forced convection in the condenser. The results showed that the use of graphene oxide nanofluid reduced considerably the thermal resistance and the operating temperature of the thermosyphon, when compared to the use of distilled water as a working fluid, furthermore, the volumetric concentration of 2.5% presented the optimized results among the analyzed working fluids.

KEYWORDS: thermosyphon, nanofluid, graphene oxide, experimental.

INTRODUÇÃO

Um dos desafios para os projetos tecnológicos de diversos dispositivos, especialmente a partir do início do século XXI, é a redução de sua massa, buscando diminuir seu consumo de energia e emissões de CO₂. Dessa forma, faz-se necessária a substituição de metais por materiais sintéticos mais leves, os quais apresentam-se como maus condutores de calor. Portanto, são requeridas novas e mais eficientes abordagens de arrefecimento, para as quais os termosifões mostram-se de forma promissora e cada vez mais aplicados (Nikolayev, 2021).

Os termosifões são dispositivos passivos capazes de transferir quantidades notáveis de calor através do calor latente de um fluido de trabalho (Maldonado *et al.*, 2020). Tais sistemas apresentam uma alta condutividade térmica, com temperatura praticamente constante, podendo ser várias ordens de magnitude maior do que a condução pura através de um metal sólido, fato qual confere aos termosifões a designação de supercondutores (Ramos *et al.*, 2016).

O fornecimento de energia na forma de calor nesses dispositivos acontece na região do evaporador, realizando a evaporação do fluido de trabalho; esse vapor flui ao longo da seção adiabática, a qual encontra-se isolada do meio, em direção ao condensador, onde ocorre a rejeição do calor e a condensação do fluido de trabalho, conforme representado na Figura 1. O retorno do fluido de trabalho para o evaporador, fato que completa o ciclo termodinâmico, ocorre por ação da força gravitacional nos termosifões (Reay *et al.*, 2018).

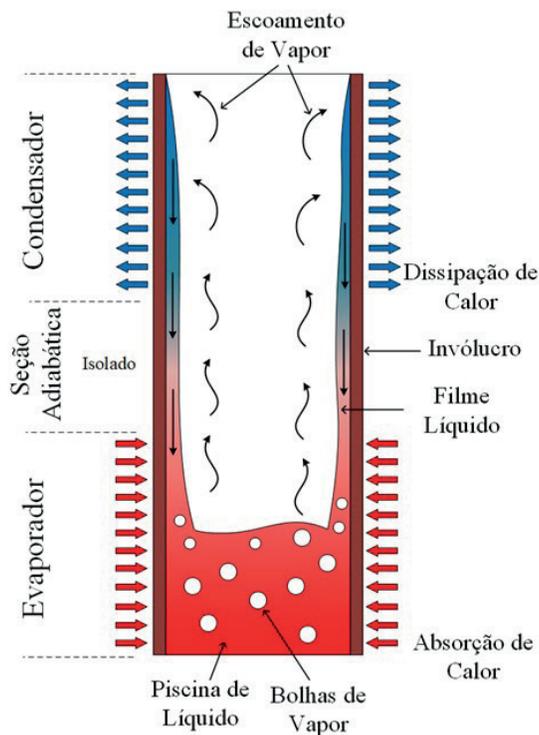


FIGURA 1. Diagrama esquemático do funcionamento de um termosifão.

Fonte: Machado (2022).

Outro ponto essencial na busca pela melhoria de sistemas térmicos é o aumento da capacidade de transferência de calor dos fluidos de trabalho. Avanços na nanotecnologia tornaram possível o desenvolvimento de nanofluidos, que são produzidos pela dispersão de nanopartículas em um fluido base, os quais possibilitam grandes desenvolvimentos em diferentes setores industriais em termos de meio ambiente, energia e economia (Ghorabae *et al.*, 2021).

Durante os últimos anos, diversas pesquisas avaliaram a viabilidade do uso de nanofluidos em termosifões. Os resultados demonstraram uma diminuição da resistência térmica do dispositivo e um aumento da quantidade de energia transferida, resultando em um aprimoramento da eficiência geral do sistema em comparação com a configuração operando com água destilada como fluido de trabalho (Jouhara *et al.*, 2017).

JUSTIFICATIVA

De acordo com Ghorabae *et al.* (2021), diversas variáveis afetam o desempenho de termossifões, tais como: carga térmica, material do tubo, dimensões, razão de preenchimento, ângulo de inclinação e fluido de trabalho; o qual, devido às propriedades termofísicas correspondentes, é o parâmetro dominante na eficiência do dispositivo. Desse modo, o presente estudo demonstra, de forma experimental, uma avaliação dos seguintes parâmetros operacionais: carga térmica, ângulo de inclinação e fluido de trabalho, visando uma melhoria na eficiência térmica do sistema, que representa uma economia de custos para indústrias e maior preservação do meio ambiente para a humanidade.

OBJETIVO

Neste contexto, o presente artigo tem por objetivo geral analisar, de forma experimental, o desempenho térmico de termossifões, que podem ser aplicados ao resfriamento de sistemas eletroeletrônicos, utilizando nanofluido de óxido de grafeno, com concentrações volumétricas de 5,0% e 2,5%, e água destilada, como fluidos de trabalho, além de variar parâmetros operacionais como carga térmica e inclinação de trabalho.

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados em detalhes as características dos termossifões, o processo de síntese do nanofluido de óxido de grafeno e a metodologia e procedimentos experimentais utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

Descrição do Problema

Para a presente investigação experimental foram construídos termossifões em configurações de acordo com Antonini Alves *et al.* (2018). Para o dispositivo passivo de transferência de calor (termossifão) foi comparada a utilização de água destilada como fluido de trabalho em relação ao nanofluido de óxido de grafeno com diferentes concentrações volumétricas considerando cargas térmicas crescentes e duas diferentes inclinações de operação.

Construção dos Termossifões

A construção dos termossifões foi realizada no Laboratório de Controle Térmico (LabCT) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* Ponta Grossa.

A metodologia utilizada no processo de construção desses dispositivos (limpeza, montagem, teste de estanqueidade, procedimento de evacuação e preenchimento com fluido de trabalho), na montagem do aparato experimental e no procedimento experimental foi baseada em Antonini Alves *et al.* (2018).

Características dos Termossifões e do Nanofluido de Óxido de Grafeno

Os dispositivos foram constituídos por um invólucro de cobre ASTM B75, com 200mm de comprimento, diâmetros interno e externo iguais a 7,75mm e 9,45mm, respectivamente. As tampas de fechamento foram usinadas a partir de uma barra maciça de cobre, com diâmetro de 9,45mm, e uma delas apresenta um furo passante para a inserção do capilar, de diâmetro externo igual a 1,62mm (0,064") e comprimento de 40mm. A Figura 2 demonstra os componentes básicos dos termossifões.

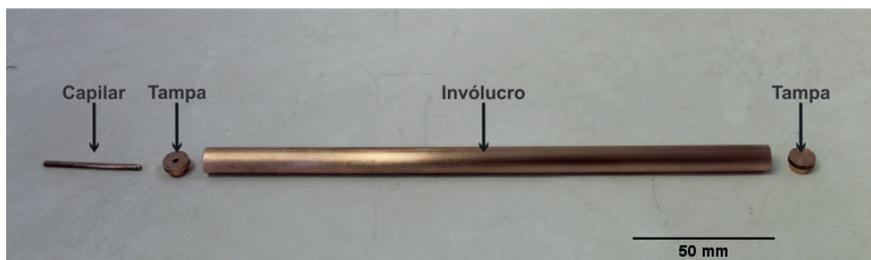


FIGURA 2: Componentes básicos dos termossifões.

Fonte: Autoria própria (2022).

Os termossifões apresentam um evaporador de 80mm de comprimento, uma seção adiabática de 20mm e um condensador de 100mm de comprimento. De acordo com Aguiar (2016), a razão de preenchimento ideal para o termossifão com essa configuração é de 40% do volume total do evaporador. Os fluidos de trabalho utilizados foram água destilada e nanofluidos de óxido de grafeno com concentrações volumétricas de 5,0% (denominado GO 5,0%) e de 2,5% (denominado GO 2,5%).

O nanofluido de óxido de grafeno foi sintetizado através do Método de *Hummers* (Hummers e Offeman, 1958), a partir de grafite em pó, com modificação na reação, retirando o nitrato de sódio (NaNO_3), chamada Síntese *Eco-friendly* ou Método de *Hummers* Modificado. A sintetização do óxido de grafeno foi executada no Laboratório de Sistemas Nanoestruturados (LabSisNano) do Departamento Acadêmico de Física (DAFIS) da UTFPR/Ponta Grossa. Maiores informação sobre a síntese e caracterização do nanofluido de óxido de grafeno utilizado nesse trabalho podem ser encontradas em lanczkovski (2022).

Aparato Experimental

O aparato experimental utilizado para o presente estudo foi composto por um sistema de aquisição de dados *Keysight™* DAQ970A com um multiplexador de 20 canais *Keysight™* DAQM901A, uma fonte automática de potência *Keysight™* E36232A, um microcomputador, um *nobreak APC™*, um suporte com garra universal, um ventilador axial *Ultra™* e um anemômetro portátil *Itan™* 720, conforme ilustrado na Figura 3.

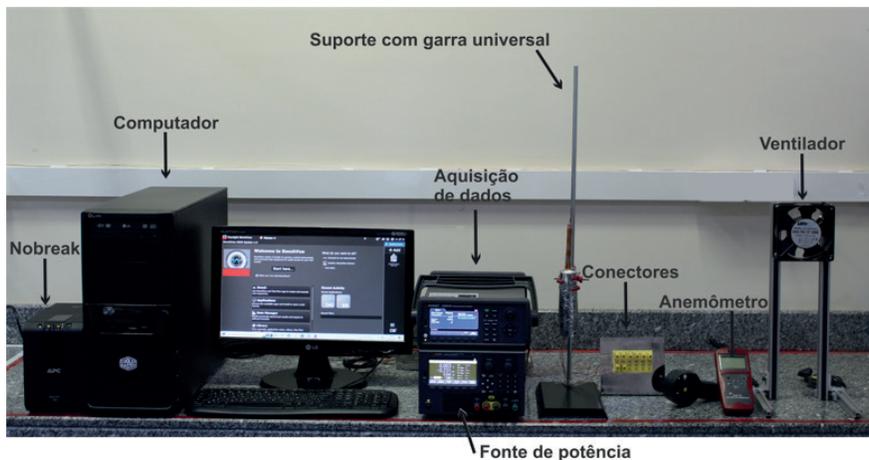


FIGURA 3: Aparato experimental.

Fonte: Autoria própria (2022).

Para obtenção das temperaturas ao longo do comprimento dos dispositivos, foram utilizados 8 termopares *Omega Engineering™* do Tipo K (cromel-alumel), sendo 3 no evaporador, 1 na seção adiabática e 4 no condensador. Os termopares foram fixados na parede externa dos invólucros dos termosifões com auxílio de uma fita adesiva termosensível *Kapton™*.

A dissipação de potência no evaporador ocorreu através da passagem de uma corrente elétrica em um resistor elétrico, composto por uma fita resistiva de liga níquel-cromo (80/20) *Omega Engineering™*, gerando um aquecimento por Efeito *Joule* na região. Esse resistor elétrico foi enrolado no evaporador e sua fixação foi realizada através de fita adesiva termosensível *Kapton™*, as pontas da fita resistiva do sistema de aquecimento foram conectadas através de conectores elétricos do tipo garra-jacaré com a fonte automática de potência.

Para garantir que o calor gerado por Efeito *Joule* fosse transferido para o evaporador, e, evitando perdas de calor para o ambiente da seção adiabática, foi necessário a utilização de um isolamento, composto por fibra de vidro, isolamento aeronáutico e tubo esponjoso blindado.

Procedimento Experimental

Para que os testes experimentais pudessem ser comparados foi necessário o controle da temperatura ambiente do Laboratório de Controle Térmico (LabCT) realizado através de um sistema de ar condicionado *Rhemm™* em $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Os termosifões foram fixados, através da seção adiabática, ao suporte universal com garra, e, subsequentemente, foram ajustados em inclinações de 90° ou 45° , em relação a horizontal, sempre com o

evaporador abaixo do condensador, como apresentado na Figura 4. Para a convecção forçada no condensador, o ventilador foi fixado de forma que o escoamento de ar incidente sobre a parede externa dos dispositivos passivos estivesse em aproximadamente 5,0m/s, controlado através do anemômetro portátil, com erro experimental de $\pm 0,2\text{m/s}$.

Os testes experimentais foram repetidos três vezes, para cada fluido de trabalho e inclinação analisados. A carga térmica aplicada ao evaporador variou entre 5W até 45W, com intervalos crescentes de 5W; cada potência foi mantida por 15 minutos, onde foi possível verificar a condição de funcionamento em regime *quasi* permanente. Devido a questões de segurança, a temperatura máxima do evaporador durante os testes experimentais foi de 150°C. A aquisição de dados foi realizada a cada 10 segundos, através do sistema de aquisição de dados e do software *Keysight BenchVue™*, e, posteriormente os dados foram tratados nos softwares *Microsoft Excel™* e *OriginLab™*.

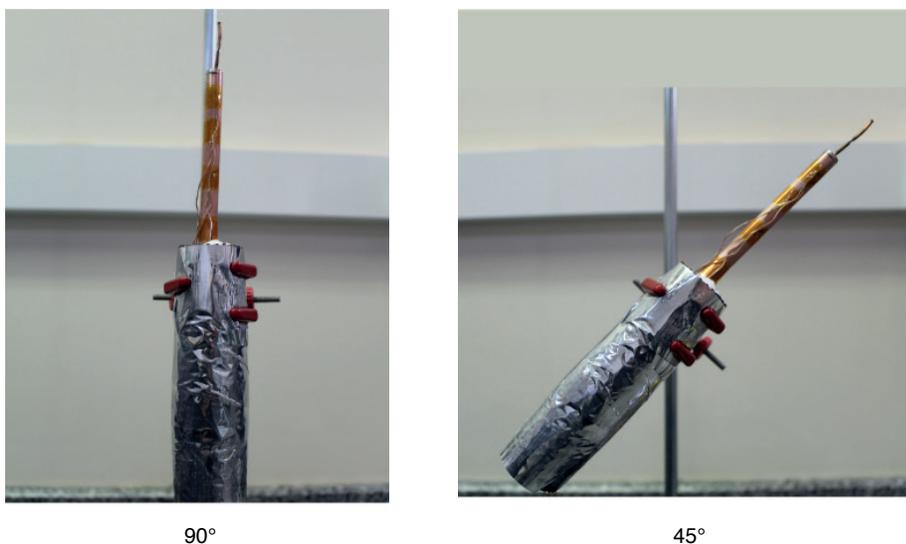


FIGURA 4: Inclinações dos testes experimentais.

Fonte: Autoria própria (2022).

Procedimento de Cálculo

A resistência térmica global de um termossifão, R_{th} , é definida por Reay *et al.* (2018) como a razão entre a diferença de temperaturas do evaporador e do condensador e a taxa de transferência de calor total (carga térmica) e pode ser expressa por:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{T_{evap} - T_{cond}}{q}, \quad (1)$$

sendo que, T_{evap} é a temperatura média do evaporador [°C], T_{cond} é a temperatura média do condensador [°C] e q é a potência aplicada no evaporador [W].

Para a análise das incertezas experimentais foi utilizado o método descrito por Holman (2011) e as propagações de incertezas das diferentes magnitudes relacionadas ao estudo experimental foram analisadas através do software *Engineering Equation Solver™* (*EES™*).

RESULTADOS

Na presente seção são apresentados e discutidos os resultados dos dispositivos passivos de transferência de calor com os diferentes fluidos de trabalho, sob diferentes condições de carga térmica e inclinação de operação.

Termossifão com Água Destilada

A distribuição de temperaturas em relação ao tempo, para os testes experimentais do termossifão contendo água destilada na inclinação de 90° (posição vertical) é apresentada na Figura 5. É possível verificar os diferentes valores de temperatura assumidos pelas diferentes regiões do termossifão em função da potência dissipada, onde o evaporador apresenta os valores de temperaturas mais elevados, a seção adiabática com valor de temperatura intermediário, e, o condensador, devido a ação de convecção forçada, com os menores valores de temperaturas. O dispositivo passivo de transferência de calor alcançou o regime *quasi* permanente em torno de 700 segundos, após a aplicação da primeira carga térmica no evaporador.

A Figura 6 mostra a distribuição de temperaturas em função do comprimento do termossifão contendo água como fluido de trabalho operando na posição vertical, a partir do qual pode ser observado um comportamento isotérmico no evaporador. Como esperado, devido às condições de convecção forçada, na região do condensador, os quatro termopares apresentaram um gradiente de temperatura ao longo de seu comprimento.

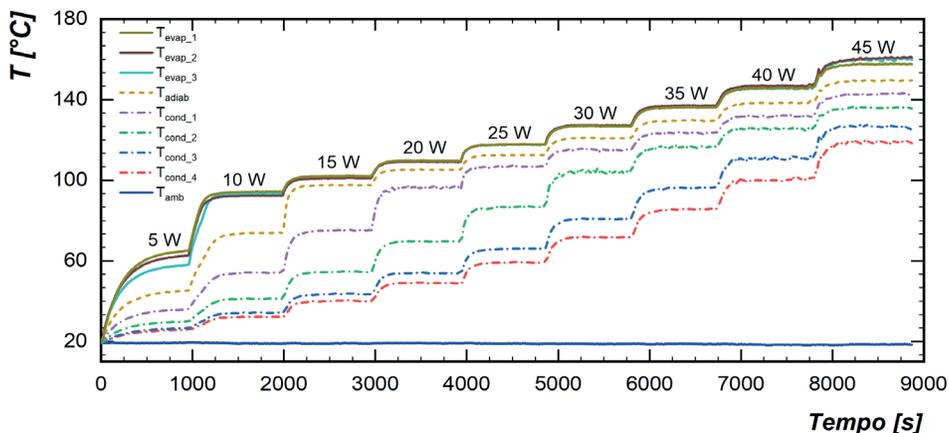


FIGURA 5: Distribuição da temperatura em função do tempo, termostato com água a 90°.

Fonte: Autoria própria (2022).

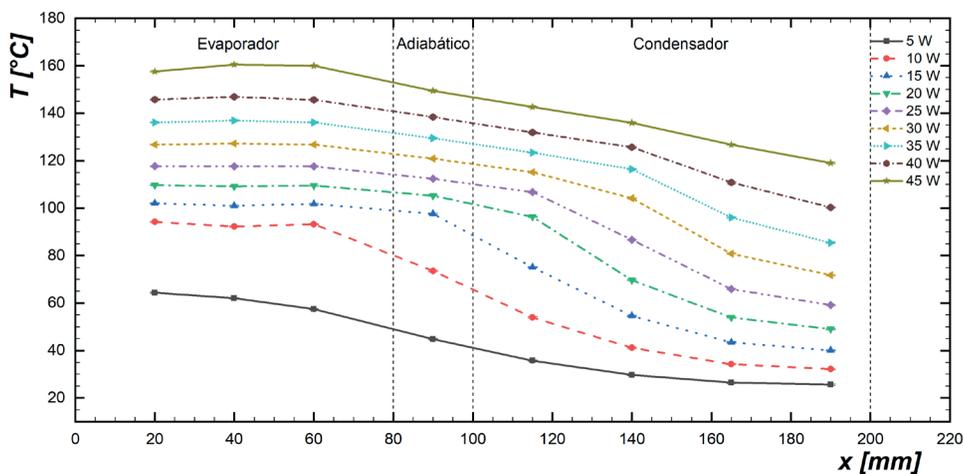


FIGURA 6: Distribuição da temperatura em função do comprimento, termostato com água a 90°.

Fonte: Autoria própria (2022).

O comparativo experimental do desempenho térmico do termostato com água destilada, em função da inclinação de trabalho, 90° ou 45°, em relação a horizontal, é apresentado nas Figuras 7 e 8, que correspondem, respectivamente, as temperaturas de operação (temperatura da seção adiabática) e as resistências térmicas dos dispositivos.

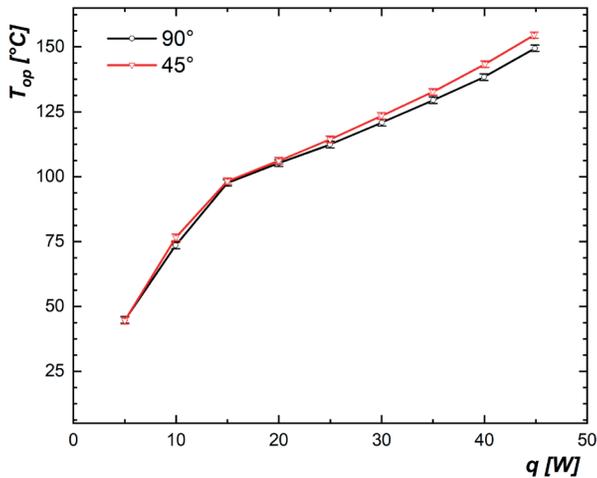


FIGURA 7: Temperatura de operação do termosifão com água.

Fonte: Autoria própria (2022).

Na Figura 7, durante o intervalo de cargas térmicas de 5W a 30W, os valores de temperatura de operação, que é correspondente a temperatura da seção adiabática, são praticamente iguais para ambas as inclinações de trabalho, pois estão dentro da faixa de incerteza experimental. Para cargas térmicas superiores a 30W, a temperatura de operação para inclinação de trabalho de 45° apresenta valores relativamente mais altos em comparação com a inclinação vertical. Em todos os casos, a temperatura de operação aumenta com o aumento da dissipação de potência no evaporador do termosifão.

Pode ser notado na Figura 8 que, para ambas as inclinações de operação, o dispositivo passivo contendo água destilada como fluido de trabalho apresentou valores de resistência térmica equivalentes, em todas as cargas térmicas. A resistência térmica diminui com o aumento da carga térmica dissipada no evaporador. Portanto, de acordo com a literatura, é possível afirmar, juntamente aos dados de temperatura de operação, que o desempenho térmico do termosifão com água destilada para as inclinações em estudo foi apropriado.

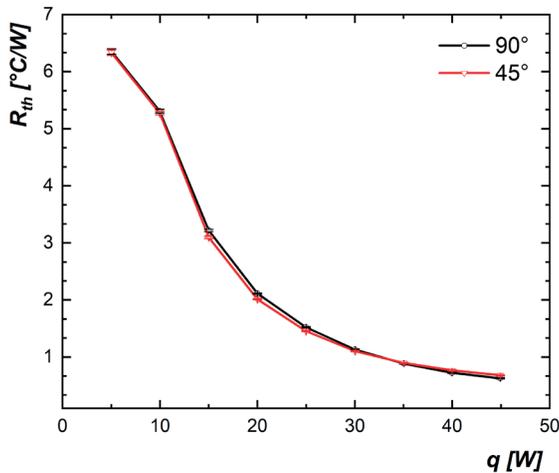


FIGURA 8: Resistência térmica do termossifão com água.

Fonte: Autoria própria (2022).

Termossifão com Nanofluido de Óxido de Grafeno 5,0%

Com base nos testes experimentais do termossifão com nanofluido de óxido de grafeno de concentração volumétrica igual a 5,0%, como fluido de trabalho, foram obtidas as distribuições de temperaturas em função do tempo e do comprimento, apresentadas nas Figuras 9 e 10, respectivamente, para a inclinação de 90° em relação a horizontal. Durante esses experimentos, o tempo de regime *quasi* permanente foi de 700s para a primeira carga térmica aplicada.

É possível observar que, para o nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 5,0% (GO 5,0%), o desempenho térmico do termossifão foi coerente, onde o evaporador apresenta as maiores temperaturas, a seção adiabática com temperatura intermediária e o condensador com as menores temperaturas, em cada uma das cargas térmicas aplicadas.

Para o evaporador foi observado uma condição isotérmica, semelhante ao uso de água destilada como fluido de trabalho. Porém, no condensador do termossifão contendo GO 5,0% foi observado um gradiente entre suas temperaturas.

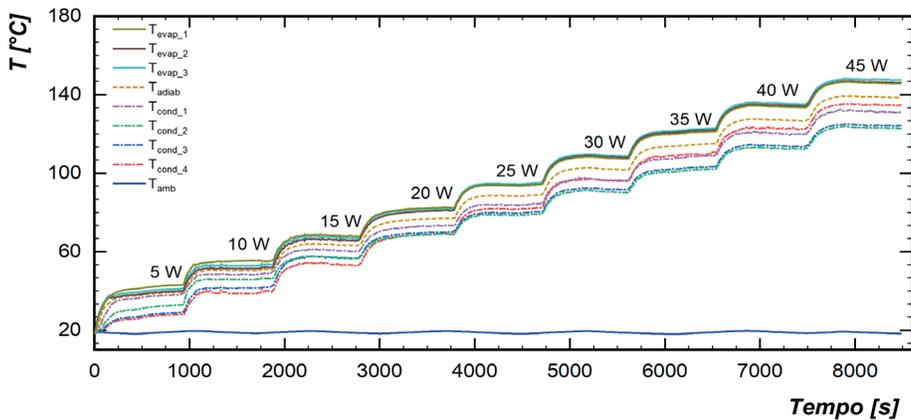


FIGURA 9: Distribuição da temperatura em função do tempo, termostato com GO 5,0% a 90°. Fonte: Autoria própria (2022).

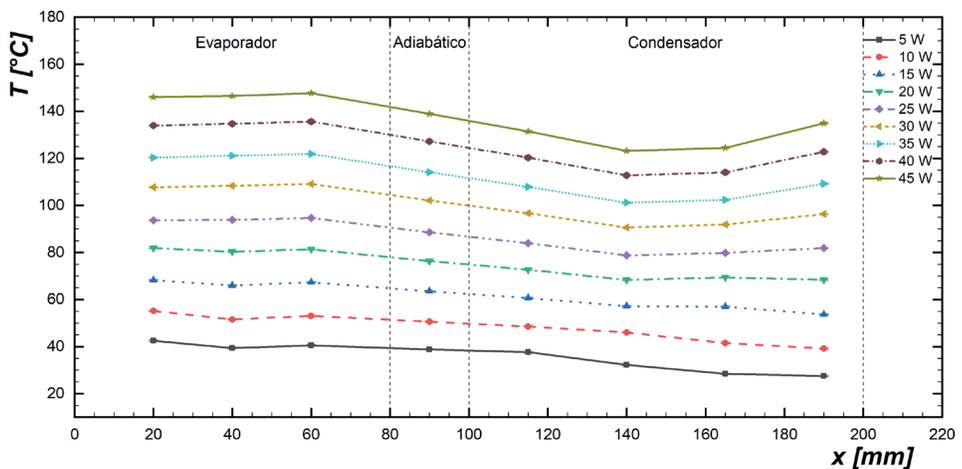


FIGURA 10: Distribuição da temperatura em função do comprimento, termostato GO 5,0% a 90°. Fonte: Autoria própria (2022).

Nas Figuras 11 e 12 são apresentadas, respectivamente, as temperaturas de operação e as resistências térmicas em função das inclinações de trabalho considerando o termostato contendo nanofluido de trabalho com concentração volumétrica de 5,0% (GO 5,0%).

De acordo com a Figura 11, na faixa de aplicação de carga térmica entre 5W e 35W, os valores de temperatura de operação, são praticamente iguais para ambas as inclinações de trabalho. Para cargas térmicas superiores a 35W, a temperatura de operação para 45° apresenta valores ligeiramente superiores. Em ambos os casos, a temperatura de operação aumenta com o aumento da carga térmica aplicada.

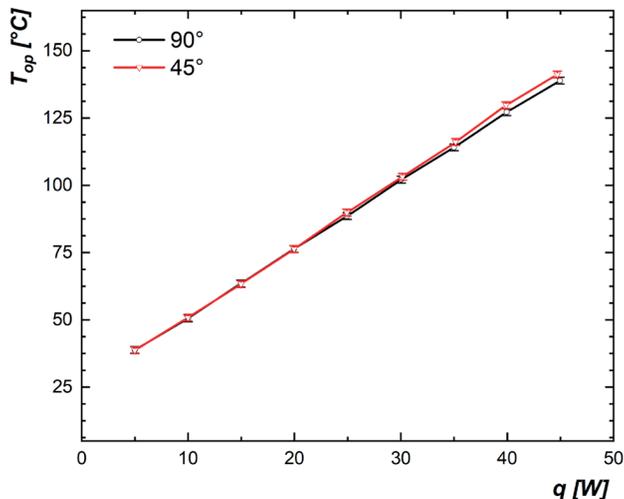


FIGURA 11: Temperatura de operação do termossifão com GO 5,0%.

Fonte: Autoria própria (2022).

A partir das curvas de resistência térmica, Figura 12, pode ser verificado que, para a inclinação de trabalho de 45°, o dispositivo apresentou valores menores de resistência térmica, porém, os resultados são muito similares à posição vertical. A resistência térmica diminui com o aumento da carga térmica aplicada. Dessa forma, é possível afirmar, juntamente aos dados de temperatura de operação, que o desempenho térmico do termossifão para as inclinações em estudo foi aceitável.

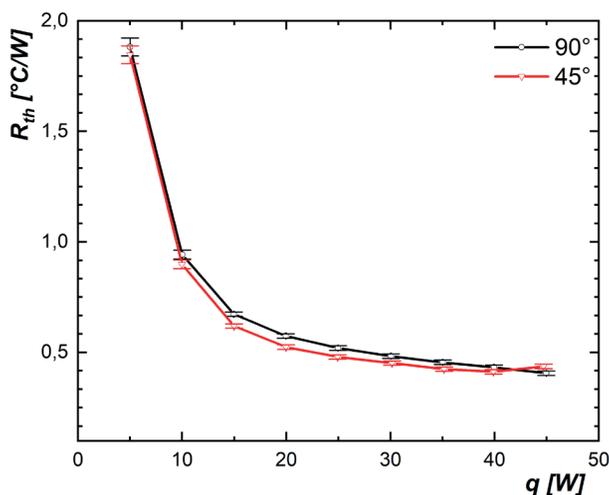


FIGURA 12: Resistência térmica do termossifão com GO 5,0%.

Fonte: Autoria própria (2022).

Termossifão com Nanofluido de Óxido de Grafeno 2,5%

Após os testes experimentais do termossifão contendo nanofluido de óxido de grafeno de concentração volumétrica igual a 2,5% (GO 2,5%) como fluido de trabalho foram obtidas as distribuições de temperaturas em função do tempo e do comprimento, apresentadas nas Figuras 13 e 14, respectivamente, para a inclinação de 90° em relação a horizontal. Para essa configuração, o tempo de regime *quasi* permanente foi de 700s.

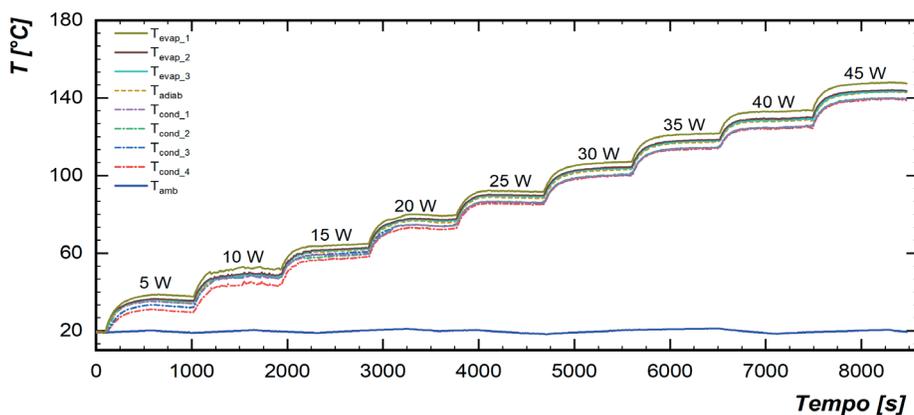


FIGURA 13: Distribuição da temperatura em função do tempo, termossifão com GO 2,5% a 90° .

Fonte: Autoria própria (2022).

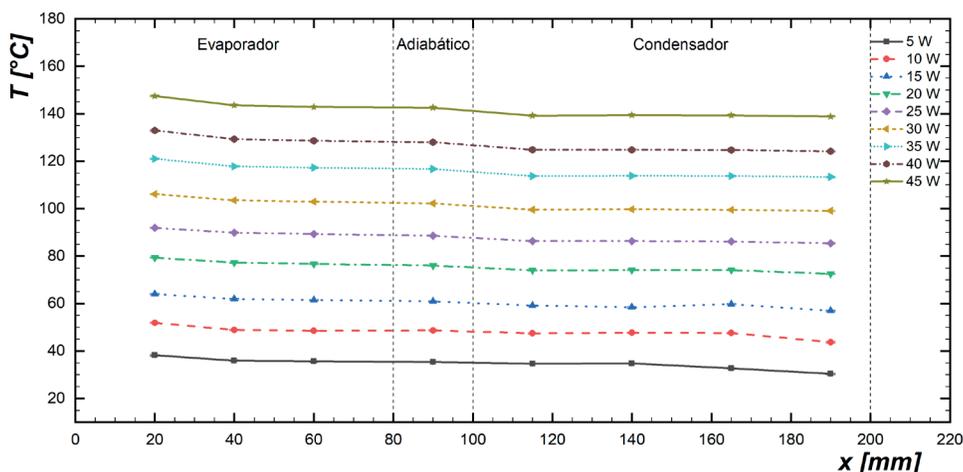


FIGURA 14: Distribuição da temperatura em função do comprimento, termossifão GO 2,5% a 90° .

Fonte: Autoria própria (2022).

Pode ser observado, para o nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5%, que o desempenho térmico do termossifão ocorreu conforme esperado, onde o evaporador apresentou as maiores temperaturas, a seção adiabática com temperatura intermediária e o condensador apresentando as menores temperaturas, em cada uma das cargas térmicas aplicadas. Pode ser notado ainda, através da Figura 14, que o evaporador e o condensador apresentaram uma condição de isotérmica em suas respectivas regiões.

A Figura 15 apresenta o comportamento da temperatura de operação do termossifão com GO 2,5% em função da carga térmica aplicada considerando ambas as inclinações de trabalho analisadas. Quanto maior a potência dissipada no evaporador maior era a temperatura de operação do termossifão.

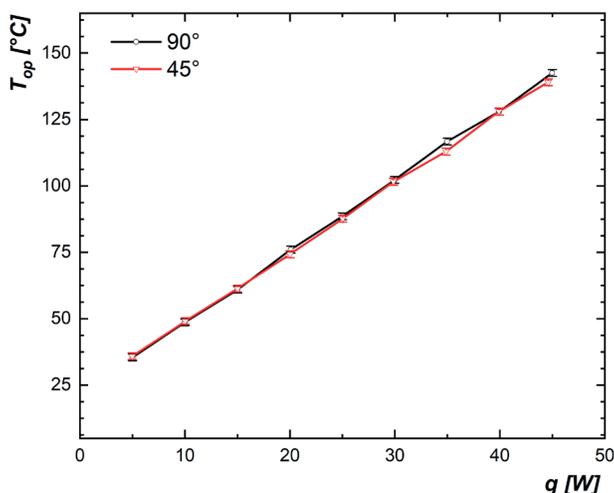


FIGURA 15: Temperatura de operação do termossifão com GO 2,5%.

Fonte: Autoria própria (2022).

De acordo com a Figura 15, no intervalo de carga térmica entre 5W e 30W, os valores de temperatura de operação, que é correspondente a temperatura da seção adiabática, são iguais para ambas as inclinações de trabalho, pois estão dentro da incerteza experimental. Após a carga térmica de 30W, com exceção da carga térmica de 35W, a temperatura de operação do termossifão para a posição vertical (inclinação de 90°) apresentou valores ligeiramente superiores aos resultados com inclinação de 45° em relação a horizontal.

A Figura 16 apresenta o comportamento da resistência térmica do termossifão contendo nanofluido de óxido de grafeno 2,5% em função da carga térmica parametrizado na inclinação de trabalho. Quanto maior a carga térmica no evaporador menor era a resistência térmica do termossifão com GO 2,5%.

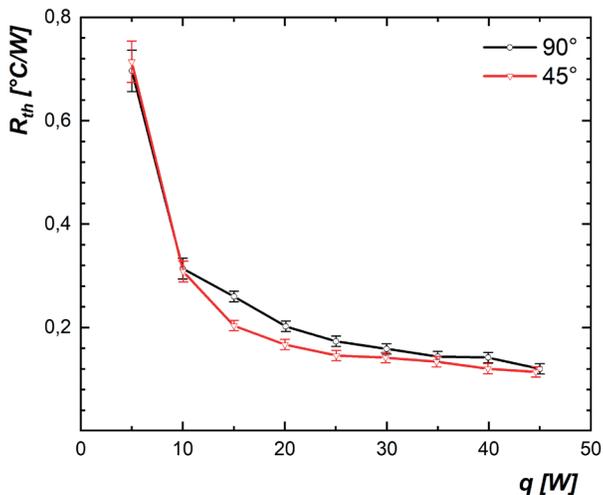


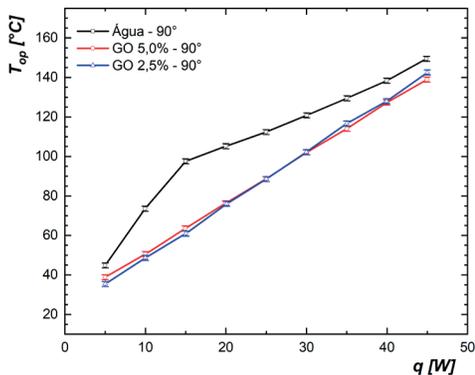
FIGURA 16: Resistência térmica do termossifão com GO 2,5%.

Fonte: Autoria própria (2022).

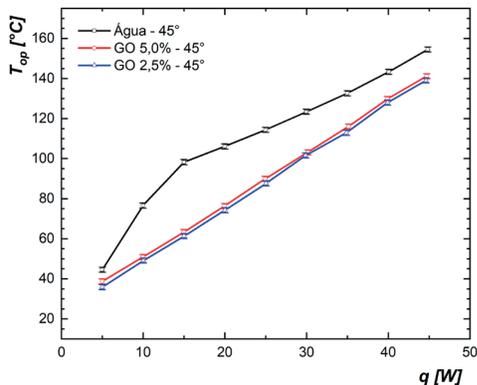
Pode ser verificado que, de uma maneira geral, para a inclinação de trabalho de 45°, o termossifão com nanofluido GO 2,5% apresentou valores menores de resistência térmica em relação aos resultados da posição vertical. Dessa forma, é possível afirmar, juntamente aos dados de temperatura de operação, que o desempenho térmico do termossifão para as inclinações de operação em estudo foi satisfatório.

Comparação entre os Fluidos de Trabalho no Termossifão

A Figura 17 apresenta um comparativo da temperatura de operação dos termossifões em função da carga térmica aplicada considerando os três diferentes fluidos de trabalho utilizados e as inclinações estudadas.



(a) 90°



(b) 45°

FIGURA 17: Temperatura de operação do termossifão para os diferentes fluidos de trabalho.

Fonte: Autoria própria (2022).

Para as duas inclinações de operação analisadas, e, em toda a faixa de aplicação da carga térmica, as temperaturas de operação dos termossifões contendo nanofluidos de óxido de grafeno exibem valores semelhantes, dentro da incerteza experimental, e inferiores aos valores para o termossifão contendo água destilada como fluido de trabalho. O ponto representativo de carga térmica de 15W apresenta as maiores diferenças relativas da temperatura de operação entre os fluidos: para o nanofluido de óxido de grafeno GO 5,0%, em comparação com a água, houve uma diminuição de 35% para a posição vertical e de 36% para a posição inclinada; enquanto que, para o nanofluido de óxido de grafeno GO 2,5%, em comparação com a água, houve uma diminuição de 38% para ambas as inclinações de operação.

A Figura 18 e a Tabela 1 apresentam o comparativo da resistência térmica dos termossifões em função da carga térmica aplicada considerando os três diferentes fluidos de trabalho utilizados, e considerando ambas as inclinações de operação analisadas.

Carga Térmica [W]	Inclinação de 90°			Inclinação de 45°		
	Água	GO 5,0%	GO 2,5%	Água	GO 5,0%	GO 2,5%
5	6,36 ± 0,05	1,88 ± 0,04	0,70 ± 0,04	6,33 ± 0,05	1,85 ± 0,04	0,71 ± 0,04
10	5,31 ± 0,03	0,94 ± 0,02	0,31 ± 0,02	5,28 ± 0,03	0,90 ± 0,02	0,31 ± 0,02
15	3,22 ± 0,02	0,67 ± 0,01	0,26 ± 0,01	3,10 ± 0,02	0,62 ± 0,01	0,20 ± 0,01
20	2,11 ± 0,01	0,57 ± 0,01	0,20 ± 0,01	2,02 ± 0,01	0,52 ± 0,01	0,17 ± 0,01
25	1,52 ± 0,01	0,52 ± 0,01	0,17 ± 0,01	1,46 ± 0,01	0,48 ± 0,01	0,15 ± 0,01
30	1,13 ± 0,01	0,48 ± 0,01	0,16 ± 0,01	1,11 ± 0,01	0,45 ± 0,01	0,14 ± 0,01
35	0,89 ± 0,01	0,46 ± 0,01	0,14 ± 0,01	0,90 ± 0,01	0,42 ± 0,01	0,13 ± 0,01
40	0,72 ± 0,01	0,43 ± 0,01	0,14 ± 0,01	0,77 ± 0,01	0,41 ± 0,01	0,12 ± 0,01
45	0,63 ± 0,01	0,41 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,68 ± 0,01	0,44 ± 0,01	0,11 ± 0,01

TABELA 1: Resistência térmica[°C/W] para diferentes potências, fluidos de trabalho e inclinações.

Fonte: Autoria própria (2022).

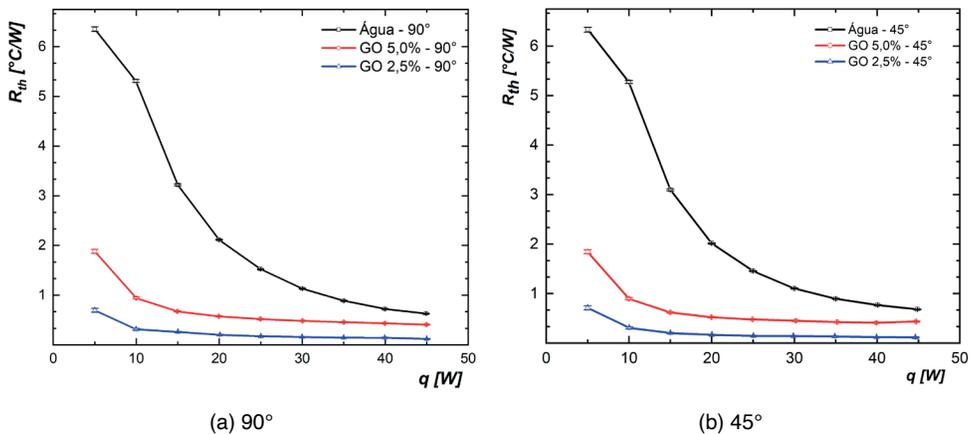


FIGURA 18: Resistência térmica do termossifão para diferentes fluidos de trabalho.

Fonte: Autoria própria (2022).

Esses resultados demonstram uma grande redução da resistência térmica do termossifão, para toda a faixa de aplicação da carga térmica, a partir da utilização do nanofluido de óxido de grafeno. Além disso, o termossifão contendo nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5% (GO 2,5%) apresentou um desempenho térmico elevado em relação ao termossifão com nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 5,0% (GO 5,0%).

O termossifão com nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 5,0% apresentou, em comparação a água destilada, uma redução máxima na resistência térmica de 82% para inclinação de trabalho de 90° (posição vertical) e de 83% para inclinação de trabalho de 45°, considerando a carga térmica de 10W. Para o termossifão

com nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5%, essa redução máxima na resistência térmica, considerando a carga térmica de 10W, foi de 94% para ambas as inclinações de operação testadas.

Alguns fatores capazes de explicar o aprimoramento no desempenho térmico dos termossifões, a partir da utilização do nanofluido de óxido de grafeno, são: as propriedades termofísicas aprimoradas dos nanofluidos em comparação ao fluido base; e, a diminuição do gradiente de temperatura na parede, fato observado na Figura 14, pela condição isotérmica no condensador e no evaporador do dispositivo passivo de transferência de calor.

Em relação às diferentes concentrações do nanofluido de óxido de grafeno, para as duas inclinações de trabalho, e, em toda a faixa de aplicação da carga térmica, o termossifão com concentração volumétrica de óxido de grafeno de 2,5% (GO 2,5%) apresenta uma diminuição na resistência térmica; por consequência, têm um acréscimo no desempenho térmico, em comparação ao termossifão com concentração volumétrica de óxido de grafeno de 5,0% (GO 5,0%). As maiores reduções relativas são apresentadas para a carga térmica de 45W, onde, na posição vertical, o valor é de 70%, enquanto que, para a posição inclinada de 45°, é de 74%.

Finalmente, destaca-se que o nanofluido de óxido de grafeno irá apresentar uma concentração ótima, em função das características da aplicação, e, considerando a relação diretamente proporcional entre concentração de nanopartículas e viscosidade do nanofluido, a diferença observada, pode estar relacionada ao aumento da viscosidade dinâmica para o fluido de trabalho com concentração volumétrica de 5,0%, em relação ao de 2,5%. Além disso, para concentrações maiores, há maior possibilidade de problemas relacionados à sedimentação e aglomeração das nanopartículas, resultando em piora no desempenho térmico.

CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos, foram observadas diminuições consideráveis na temperatura de operação e na resistência térmica do termossifão, a partir da utilização de nanofluido de óxido de grafeno como fluido de trabalho, em relação à utilização de água destilada. Essas reduções foram de até 36% na temperatura de operação e de 83% para a resistência térmica, na configuração do termossifão com nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 5,0% (GO 5,0%) e para o nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5% (GO 2,5%) as reduções máximas na temperatura de operação e na resistência térmica foram iguais a 38% e 94%, respectivamente.

As propriedades termofísicas aprimoradas dos nanofluidos de óxido de grafeno, em comparação ao fluido base, e a diminuição do gradiente de temperatura na parede do termossifão foram fatores que explicam essa melhoria no desempenho térmico do dispositivo. Dessa forma, para o termossifão, a utilização de nanofluido de óxido de grafeno

representou um aperfeiçoamento substancial em seu desempenho térmico, e além disso, a concentração volumétrica de 2,5% (GO 2,5%) demonstrou os resultados otimizados entre os fluidos de trabalho analisados.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, V. M. Influência da razão de preenchimento e da inclinação no desempenho térmico de termossifões. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 118 p., 2016.

ANTONINI ALVES, T.; KRAMBECK, L.; SANTOS, P. H. D. Heat pipe and thermosyphon for thermal management of thermoelectric cooling. In: ARANGUREN, P. (Org.). Bringing thermoelectricity into reality. InTech, London, UK, 2018.

GHORABAE, H.; EMAMI, M. R. S.; MOOSAKAZEMI, F.; KARIMI, H.; CHERAGHIAN, G.; AFRAND, M. The use of nanofluids in thermosyphon heat pipe: A comprehensive review. *Powder Technology*, v. 394, p. 250-269, 2021.

HOLMAN, J. P. Experimental methods for engineers. McGraw-Hill Science, Singapore City, SGP, 739p., 2011.

HUMMERS, W. S.; OFFEMAN, R. E. Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*, v. 80, p. 1339, 1958.

IANCZKOVSKI, H. Análise experimental do desempenho térmico de termossifões e tubos de calor contendo nanofluido de óxido de grafeno. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 91 p., 2022.

JOUHARA, H.; CHAUHAN, A.; NANNOU, T.; ALMAHMOUD, S.; DELPECH, B.; WROBEL, L.C. Heat pipe based systems - Advances and applications. *Energy*, v. 128, p. 729–754, 2017.

MACHADO, P. L. O. Sistema híbrido fotovoltaico/térmico para geração de energia elétrica e aquecimento de água utilizando termossifões. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 171 p., 2022.

MALDONADO, J. M.; DE GRACIA, A.; CABEZA, L. F. Systematic review on the use of heat pipes in latent heat thermal energy storage tanks. *Journal of Energy Storage*, v. 32, article 101733, 2020.

NIKOLAYEV, V. S. Physical principles and state-of-the-art of modeling of the pulsating heat pipe: A review. *Applied Thermal Engineering*, v. 195, article 117111, 2021.

RAMOS, J.; CHONG, A.; JOUHARA, H. Experimental and numerical investigation of a cross flow air-to-water heat pipe-based heat exchanger used in waste heat recovery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 102, p. 1267–1281, 2016.

REAY, D. A.; MCGLEN, R.; KEW, P. Heat pipe: Theory, design and applications. Butterworth-Heinemann, Amsterdam, NED, 288 p., 2018.