

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**HUMBERTO IANCZKOVSKI**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TERMOSSIFÕES E  
TUBOS DE CALOR CONTENDO NANOFLUIDO DE ÓXIDO DE GRAFENO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2022**

**HUMBERTO IANCZKOVSKI**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TERMOSSIFÕES E  
TUBOS DE CALOR CONTENDO NANOFLUIDO DE ÓXIDO DE GRAFENO**

**Experimental Analysis of Thermal Performance of Thermosyphons  
and Heat Pipes using Graphene Oxide Nanofluid**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves*

Coorientadores:

Profa. Dra. *Rozane de Fátima Turchiello Gómez*

Eng. Mec. *Victor Vaurek Dimbarre*

**PONTA GROSSA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**HUMBERTO IANCZKOVSKI**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TERMOSSIFÕES E  
TUBOS DE CALOR CONTENDO NANOFLUIDO DE ÓXIDO DE GRAFENO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 01 de julho de 2022.

---

Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves*  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/Ponta Grossa)

---

Prof. Dr. *Bernardo Argemiro Herrera Múnera*  
Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM/Medellín, Colômbia)

---

Prof. Dr. *Gerson Henrique dos Santos*  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/Ponta Grossa)

**PONTA GROSSA**

**2022**

Dedico este trabalho à minha mãe, *Maria Ianczkovski*, pela compreensão, ajuda e motivação. E a Deus, que permitiu que tudo pudesse ser realizado.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas oportunidades e realizações durante esse ciclo de graduação.

Agradeço a minha mãe, por todo o apoio e suporte antes de ingressar na universidade e durante o período do curso, onde ela nunca deixou de se preocupar, e, tentar de todas as formas me ajudar e incentivar.

A minha namorada, por todo o companheirismo e ajuda desde o primeiro semestre da faculdade, e, principalmente, neste Trabalho de Conclusão de Curso.

A todos os meus familiares de modo geral, pelas conversas e auxílios.

Ao meu orientador, Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves*, pela oportunidade, confiança e apoio no desenvolvimento do presente estudo.

A minha coorientadora, Profa. Dra. *Rozane de Fátima Turchiello Gómez*, pelas oportunidades de iniciação científica e pela continuidade da orientação e auxílio no Trabalho de Conclusão de Curso.

A todos os membros do Laboratório de Controle Térmico (LabCT), pelas palavras de apoio, de descontração e todas as formas de auxílio durante o período de desenvolvimento do estudo, em especial ao *Victor Vaurek Dimbarre* pelos esclarecimentos e orientações acerca dos experimentos.

A UTFPR e todos os servidores pelo ambiente, onde foi possível um grande crescimento acadêmico e pessoal.

*“Conquiste a sabedoria, e ela o exaltará.  
Abrace-a, e ela o honrará. Ela colocará  
em sua cabeça um belo diadema, e o  
cingirá com uma brilhante coroa”.*

*(Pr 4, 8-9).*

## RESUMO

Termossifões e tubos de calor 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 de Conclusão de Curso, foi executada uma análise experimental do desempenho térmico de termossifões e tubos de calor 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, e, para o tubo de calor foi utilizada uma tela metálica de bronze fosforoso *mesh* #130, como estrutura capilar. 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 melhores resultados entre os fluidos de trabalho analisados. Entretanto, para o tubo de calor com tela metálica, a utilização do nanofluido de óxido de grafeno não foi eficiente, visto que apresentou um aumento na resistência térmica em comparação a água destilada. Essa piora no desempenho térmico do tubo de calor foi atribuída a incrustações de aglomerados de nanopartículas de óxido de grafeno na estrutura capilar, as quais dificultam o retorno do líquido para o evaporador.

**Palavras-chave:** termossifão; tubo de calor; nanofluido; óxido de grafeno; experimental

## ABSTRACT

Thermosyphons and heat pipes 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 Work of Conclusion Course, an experimental analysis of the thermal performance of thermosyphons and heat pipes 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, and, for the heat pipe, the capillary structure was made by phosphor bronze #130 wire mesh. 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 best results among the analyzed working fluids. However, for the heat pipe with wire mesh, the use of graphene oxide nanofluid was not efficient, was observed an increase in thermal resistance compared to distilled water. This worsening in the thermal performance of the heat pipe was attributed to incrustations of agglomerates of graphene oxide nanoparticles in the capillary structure, which made difficult for the liquid to return to the evaporator.

**Keywords:** thermosyphon; heat pipe; nanofluid; graphene oxide; experimental.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Consumo global de energia primária por fonte. ....	14
Figura 2: Seções principais de um termossifão. ....	15
Figura 3: Ciclo de trabalho de um termossifão e de um tubo de calor. ....	19
Figura 4: (a) estrutura do grafeno, (b) estrutura do óxido de grafeno. ....	22
Figura 5: Imagem microscópica (MEV) da tela metálica mesh #130. ....	32
Figura 6: Procedimento de síntese do nanofluido de óxido de grafeno. ....	39
Figura 7: Distribuição dos comprimentos e imagens microscópicas (MEV) das folhas de óxido de grafeno. ....	40
Figura 8: Radiação incidente e transmitida sobre uma amostra. ....	41
Figura 9: Posicionamento dos termopares em [mm]. ....	44
Figura 10: Pontos de incrustação na estrutura capilar do tubo de calor. ....	69
Figura 11: Pontos de análise EDS na estrutura capilar após testes experimentais com nanofluido. ....	70

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1: Componentes básicos dos termossifões. ....	31
Fotografia 2: Banho ultrassônico. ....	34
Fotografia 3: (a) Inserção da tela metálica no invólucro do tubo de calor, (b) interior do termossifão. ....	34
Fotografia 4: Tubo de calor construído. ....	35
Fotografia 5: Teste de estanqueidade. ....	35
Fotografia 6: Procedimento de evacuação. ....	36
Fotografia 7: Estação de preenchimento. ....	37
Fotografia 8: Brasagem do capilar. ....	38
Fotografia 9: Bancada do espectrofotômetro. ....	42
Fotografia 10: Cubetas com amostras. ....	43
Fotografia 11: Aparato experimental. ....	44
Fotografia 12: Sistema de aquecimento. ....	45
Fotografia 13: Inclinações dos testes experimentais. ....	46
Fotografia 14: Comparativo entre telas metálicas antes e depois dos testes. ....	69

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Resistência térmica de cada seção conforme a entrada de calor: (a) evaporador, (b) condensador.....	24
Gráfico 2: Resistência térmica dos dispositivos passivos em Krambeck et al. (2019). .....	25
Gráfico 3: Resistência térmica do termossifão para 90° em Das et al. (2019). .....	27
Gráfico 4: Comparação da resistência térmica do termossifão com água e com nanofluido, de acordo com Herrera et al. (2021). .....	28
Gráfico 5: Espectros das concentrações volumétricas de nanofluido (a) 2,5% e (b) 5,0%. .....	48
Gráfico 6: Espectro do nanofluido de óxido de grafeno com concentração mássica de 0,1%. .....	49
Gráfico 7: Espectros dos nanofluidos de óxido de grafeno. ....	49
Gráfico 8: Distribuição da temperatura em função do tempo para o termossifão com água a 90°. .....	50
Gráfico 9: Distribuição da temperatura em função do comprimento para o termossifão com água a 90°. .....	51
Gráfico 10: Temperatura de operação do termossifão com água. ....	51
Gráfico 11: Resistência térmica do termossifão com água. ....	52
Gráfico 12: Distribuição da temperatura em função do tempo para o termossifão com GO 5,0% a 90°. .....	53
Gráfico 13: Distribuição da temperatura em função do comprimento para o termossifão com GO 5,0% a 90°. .....	54
Gráfico 14: Temperatura de operação do termossifão com GO 5,0%. .....	54
Gráfico 15: Resistência térmica do termossifão com GO 5,0%. .....	55
Gráfico 16: Distribuição da temperatura em função do tempo para o termossifão com GO 2,5% a 90°. .....	56
Gráfico 17: Distribuição da temperatura em função do comprimento para o termossifão com GO 2,5% a 90°. .....	56
Gráfico 18: Temperatura de operação do termossifão com GO 2,5%. .....	57
Gráfico 19: Resistência térmica do termossifão com GO 2,5%. .....	58
Gráfico 20: Temperatura de operação do termossifão para os diferentes fluidos de trabalho (a) 90°, (b) 45°. .....	59
Gráfico 21: Resistência térmica do termossifão para os diferentes fluidos de trabalho (a) 90°, (b) 45°. .....	60
Gráfico 22: Distribuição da temperatura em função do tempo para o tubo de calor com água a 90°. .....	62
Gráfico 23: Distribuição da temperatura em função do comprimento para o tubo de calor com água a 90°. .....	62
Gráfico 24: Temperatura de operação do tubo de calor com água. ....	63
Gráfico 25: Resistência térmica do tubo de calor com água. ....	63

Gráfico 26: Distribuição da temperatura em função do tempo para o tubo de calor com GO 2,5% a 90° .	64
Gráfico 27: Distribuição da temperatura em função do comprimento para o tubo de calor com GO 2,5% a 90°	65
Gráfico 28: Temperatura de operação do tubo de calor com GO 2,5%.	66
Gráfico 29: Resistência térmica do tubo de calor com GO 2,5%.	66
Gráfico 30: Temperatura de operação do tubo de calor para os diferentes fluidos de trabalho (a) 90°, (b) 45°	67
Gráfico 31: Resistência térmica do tubo de calor para os diferentes fluidos de trabalho (a) 90°, (b) 45°	68
Gráfico 32: Espectro e concentrações em peso dos elementos químicos no Ponto 1.	71
Gráfico 33: Espectro e concentrações em peso dos elementos químicos no Ponto 2.	71
Gráfico 34: Espectro e concentrações em peso dos elementos químicos no Ponto 3.	72

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características estruturais dos termossifões e tubos de calor.	31
Tabela 2: Incertezas experimentais.	47
Tabela 3: Resistência térmica, em °C/W, do termossifão para diferentes potências, fluidos de trabalho e inclinações.	60
Tabela 4: Resistência térmica, em °C/W, do tubo de calor para diferentes potências, fluidos de trabalho e inclinações.	68

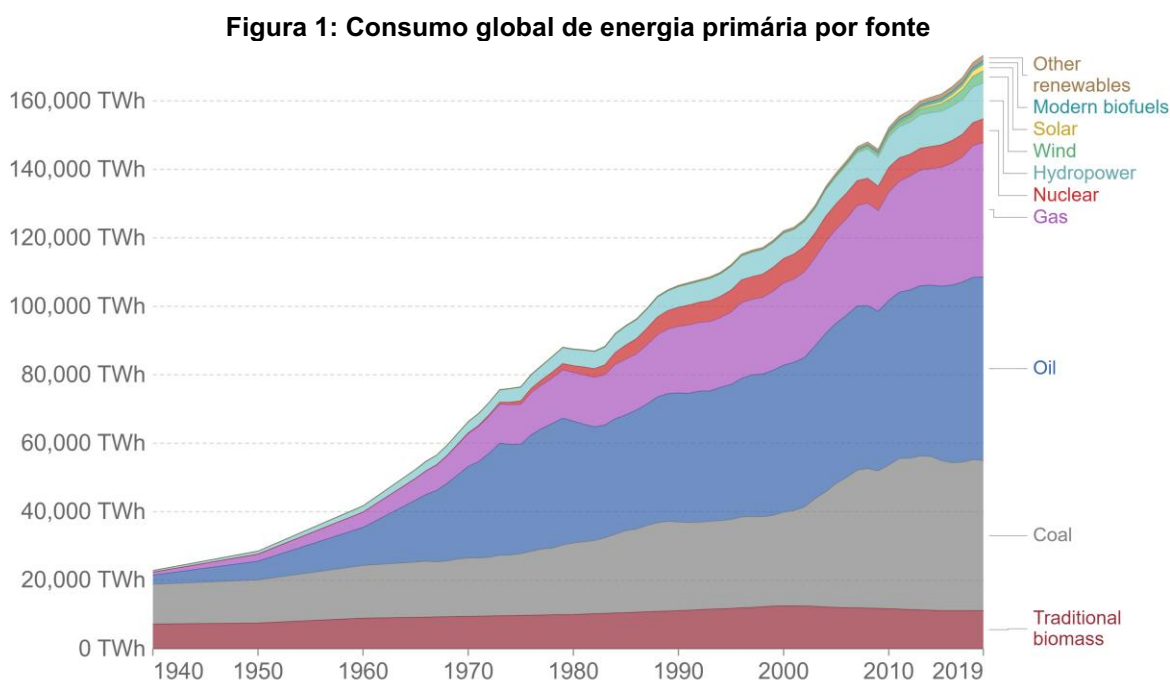
## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Delimitação do problema .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 Justificativa .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Objetivos.....</b>	<b>17</b>
1.3.1 Objetivo Geral.....	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Termossifões e tubos de calor .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Nanofluido de óxido de grafeno .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 Estado da arte .....</b>	<b>23</b>
<b>3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1 Descrição do problema .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2 Construção dos termossifões e tubos de calor .....</b>	<b>30</b>
3.2.1 Características dos Termossifões e Tubos de Calor .....	30
3.2.2 Procedimento de Limpeza .....	33
3.2.3 Montagem dos Termossifões e Tubos de Calor .....	34
3.2.4 Teste de Estanqueidade .....	35
3.2.5 Procedimento de Evacuação .....	36
3.2.6 Preenchimento dos Termossifões e Tubos de Calor com Fluido de Trabalho	37
<b>3.3 Nanofluido de óxido de grafeno .....</b>	<b>38</b>
3.3.1 Síntese do Nanofluido de Óxido de Grafeno .....	39
3.3.2 Caracterização do Nanofluido de Óxido de Grafeno.....	41
<b>3.4 Aparato experimental .....</b>	<b>43</b>
<b>3.5 Procedimento experimental .....</b>	<b>45</b>
<b>3.6 Procedimento de cálculo.....</b>	<b>46</b>
<b>3.7 Análise de incertezas.....</b>	<b>47</b>

<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>48</b>
<b>4.1 Caracterização do nanofluido de óxido de grafeno .....</b>	<b>48</b>
<b>4.2 Termossifão.....</b>	<b>50</b>
4.2.1 Termossifão com Água Destilada .....	50
4.2.2 Termossifão com Nanofluido de Óxido de Grafeno 5,0% .....	53
4.2.3 Termossifão com Nanofluido de Óxido de Grafeno 2,5% .....	55
4.2.4 Comparação entre os Fluidos de Trabalho no Termossifão .....	58
<b>4.3 Tubo de calor .....</b>	<b>61</b>
4.3.1 Tubo de Calor com Água Destilada .....	61
4.3.2 Tubo de Calor com Nanofluido de Óxido de Grafeno 2,5% .....	64
4.3.3 Comparação entre os Fluidos de Trabalho no Tubo de Calor .....	67
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>82</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>84</b>
<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICE E .....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICE F.....</b>	<b>90</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Devido a eventos como as grandes crises de petróleo, buscaram-se inovações tecnológicas, visando melhorar de forma significativa a eficiência energética em indústrias químicas e de processo térmico (KLEMEŠ et al., 2020). De acordo com os dados publicados por Ritchie e Roser (2020), a demanda por energia está crescendo em muitos países do mundo, como é possível observar na Figura 1. Ainda, conforme esses pesquisadores, se o aumento dessa demanda não for compensado por incrementos na eficiência energética, o consumo global de energia continuará crescendo, fato que torna mais difícil a transição de sistemas energéticos de combustíveis fósseis para fontes de energia de baixo carbono.



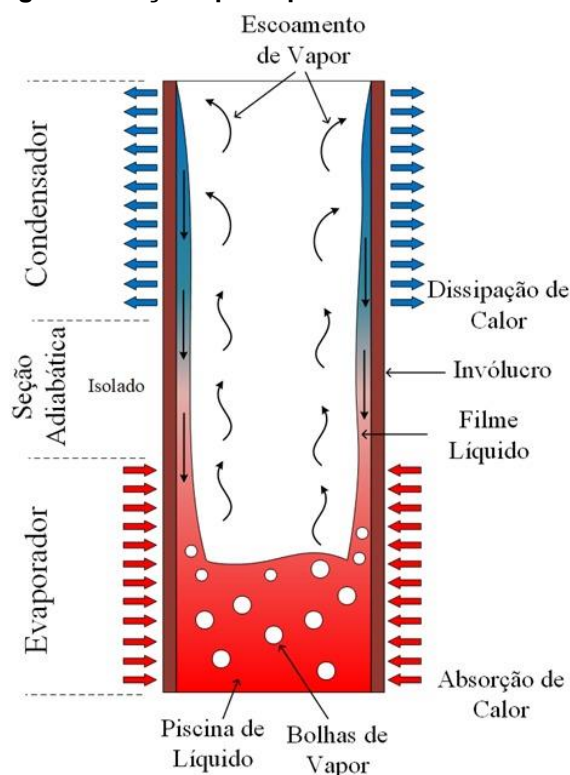
Fonte: Ritchie e Roser (2020)

Atualmente, um dos desafios para projetos tecnológicos de diversos dispositivos é a redução de sua massa, buscando diminuir seu consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>. 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 tubos de calor e/ou termossifões mostram-se de forma promissora e cada vez mais aplicados (NIKOLAYEV, 2021).

Os tubos de calor e/ou termossifões 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 tubos de calor e/ou termossifões a designação de supercondutores (RAMOS et al., 2016).

A entrada 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, conforme representado na Figura 2 para um termossifão. O retorno do fluido para o evaporador, fato que completa o ciclo termodinâmico, pode acontecer por capilaridade nos tubos de calor ou por gravidade nos termossifões. Existem diferentes sistemas para otimizar o desempenho do bombeamento capilar, como: malha de tela, metal sinterizado e ranhuras axiais (MALDONADO et al., 2020).

**Figura 2: Seções principais de um termossifão**



**Fonte: Machado (2022)**

Os tubos de calor e/ou termossifões têm sido amplamente aplicados em diversos dispositivos de engenharia, principalmente trocadores de calor, sistemas eletroeletrônicos e sistemas de geração e recuperação de energia, tendo em vista sua flexibilidade construtiva e excelente desempenho térmico (NARUKA et al., 2020).

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 tubos de calor e/ou termossifões. 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).

### **1.1 Delimitação do problema**

De acordo com Ghorabae et al. (2021), diversas variáveis afetam o desempenho de tubos de calor e/ou termossifões, tais como: carga térmica, material do tubo, dimensões, razão de preenchimento, ângulo de inclinação, estrutura capilar (no caso de tubos de calor) 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 da eficiência térmica de termossifões e tubos de calor, a partir da variação dos seguintes parâmetros operacionais: carga térmica, ângulo de inclinação e fluido de trabalho.

### **1.2 Justificativa**

Para Vasiliev (2021), os nanofluidos são considerados uma nova geração de meios de transferência e acumulação de calor. Tendo em vista a alta condutividade térmica dos materiais de carbono, os nanofluidos à base dessa substância



apresentam coeficientes de condutividade efetiva e de transferência de calor mais altos do que nanofluidos contendo metais ou óxidos metálicos. Portanto, o presente Trabalho de Conclusão de Curso busca uma melhoria na eficiência térmica de termossifões e tubos de calor, a partir da utilização de nanofluidos de óxido de grafeno, possibilitando uma economia de custos para indústrias e maior preservação do meio ambiente para a humanidade.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem por objetivo geral analisar, de forma experimental, o desempenho térmico de termossifões e tubos de calor, 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.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos do presente Trabalho de Conclusão de Curso são:

- fabricar termossifões e tubos de calor em cobre contendo nanofluidos de óxido de grafeno em diferentes concentrações volumétricas como fluido de trabalho;
- caracterizar o nanofluido de óxido de grafeno através de espectroscopia UV-Visível;
- investigar experimentalmente o desempenho térmico dos termossifões e tubos de calor utilizando nanofluido de óxido de grafeno como fluido de trabalho;
- analisar e comparar os resultados experimentais com os de termossifões e tubos de calor contendo água destilada como fluido de trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados os princípios de funcionamento e as principais aplicações de termossifões e/ou tubos de calor, as propriedades do nanofluido de óxido de grafeno e uma revisão de trabalhos relacionados ao tema abordado no presente estudo.

### 2.1 Termossifões e tubos de calor

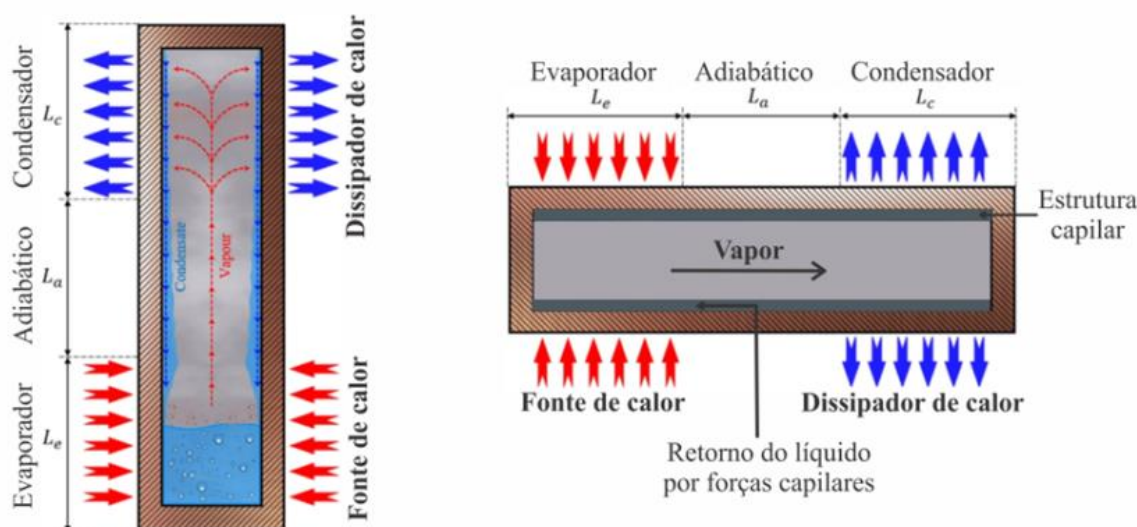
Os termossifões e tubos de calor são tubos evacuados, completamente fechados e preenchidos parcialmente com um fluido de trabalho, o qual entra em um estado de constante evaporação e condensação, a partir de uma diferença de temperatura entre as extremidades dos invólucros. O processo de mudança de fase que ocorre dentro desses dispositivos passivos de transferência de calor possibilita que uma grande quantidade de calor seja transferida, sendo essa característica responsável pela alta condutividade térmica desses dispositivos (DANIELEWICZ et al., 2014). Esse conceito foi iniciado em 1831 por *Angier March Perkins*, e posteriormente desenvolvido por *Jacob Perkins* e *Frazier W. Gay*, em 1936 e 1942, respectivamente (NAZARI et al., 2019).

Embora, esses dispositivos passivos possam apresentar diferentes geometrias e configurações, eles são basicamente compostos por três seções: *evaporador*, local onde encontra-se a fonte de calor responsável pelo aquecimento e mudança de fase líquido para fase vapor do fluido de trabalho; *seção adiabática*, a qual pode existir devido à uma lacuna entre a fonte e o dissipador de calor, e, encontra-se isolada; e, o *condensador*, onde o calor é removido: o vapor contido nessa região condensa enquanto o líquido resultante retorna ao evaporador, completando o ciclo (MANTELLI, 2021). A Figura 3 ilustra as principais regiões e os ciclos de trabalho de um termossifão e de um tubo de calor.

Em tubos de calor convencionais, o retorno do líquido do condensador ao evaporador ocorre através de bombeamento capilar. Esse tipo de tubo de calor é menos suscetível à orientação, e pode funcionar em situações de ausência da força da gravidade. Os tubos de calor pulsantes (PHPs) são feitos de um tubo capilar e possuem várias curvas, sendo dispositivos mais compactos. O movimento do fluido

de trabalho nesse tipo de tubo de calor é resultado das instabilidades de pressão no interior do mesmo, devido aos diferentes pontos de entrada de calor. Nos termossifões, por sua vez, o líquido condensado retorna ao evaporador através da assistência da gravidade, dessa forma, sua operação é sensível à orientação de trabalho e, portanto, o condensador deve encontrar-se sempre acima do evaporador (NAZARI et al., 2019).

Figura 3: Ciclo de trabalho de um termossifão e de um tubo de calor



Fonte: Adaptado de Guichet et al. (2019)

Diversos parâmetros operacionais afetam o desempenho térmico dos termossifões e/ou tubos de calor, tais como: *quantidade de energia aplicada ao evaporador*, onde o aumento da entrada de calor resulta em uma menor resistência térmica do dispositivo; *material que constitui o invólucro*, em que a melhoria na transferência de calor por condução facilita uma alta na condutividade térmica do dispositivo; *razão de preenchimento*, sendo essa descrita como a quantidade de fluido de trabalho em relação ao volume do evaporador; *ângulo de inclinação*, normalmente, valores próximos a  $90^\circ$  do condensador em relação a horizontal são apropriados, pois facilitam o retorno do líquido condensado para o evaporador; *fluido de trabalho*, o qual pode ser o fator mais relevante em função das condições de aplicação e; para tubos de calor, *estrutura capilar*, facilitando o retorno do fluido de trabalho do condensador para o evaporador (RAMEZANIZADEH et al., 2018).

Conjuntos baseados em termossifões e/ou tubos de calor são utilizados em diversas áreas industriais, por exemplo: espacial, computação e sistemas eletroeletrônicos, dessalinização de água, ventilação e ar condicionado, sistemas de

energia solar, e sistemas nucleares, com uma gama que envolve aplicações abaixo de 0°C até mais 1.000°C, dependendo do fluido de trabalho e dos materiais empregados na confecção do invólucro (MROUE et al., 2015).

De acordo com Mantelli (2021), os invólucros podem ser constituídos de metal, cerâmica ou outro material, e diferentes líquidos são aceitáveis como fluidos de trabalho, tendo como exemplo água, álcool, naftaleno, nitrogênio líquido, entre outros; e a seleção desses materiais depende da temperatura de operação e da aplicação requerida para o dispositivo passivo de transferência de calor. Para os tubos de calor, a estrutura capilar pode ser confeccionada por diferentes materiais porosos: telas metálicas, pó de metal sinterizado, ranhuras longitudinais, fibra de vidro corrugada, entre outros. Além disso, o material do invólucro deve ser quimicamente compatível com o fluido de trabalho, visando evitar a formação de gases não condensáveis, os quais bloqueiam parte do condensador, diminuindo seu desempenho. E, para os tubos de calor, a estrutura capilar deve fornecer a capacidade de bombeamento necessária ao líquido e ser compatível com o material do invólucro e com o fluido de trabalho.

## 2.2 Nanofluido de óxido de grafeno

O nanofluido é constituído de um fluido base, sendo água, óleo ou etilenoglicol, misturado a uma pequena fração de nanopartículas. A partir dessa combinação, obtém-se um líquido com propriedades termofísicas aprimoradas. Entretanto, existem alguns limites para essa mistura, tais como: a *concentração das nanopartículas*, que não deve exceder 0,5% em peso, para evitar problemas de sedimentação e alta queda de pressão do sistema; o *tamanho da partícula*, sendo obrigatoriamente menor que 100nm, a fim de evitar uma combinação instável. Nanofluidos com características corretas apresentam um aumento significativo na condutividade térmica, pois, através de sua alta relação superfície-volume e do movimento *Browniano* (colisões aleatórias entre moléculas sólidas e líquidas), a transferência de calor entre as partículas constituintes do nanofluido irá intensificar-se. Dessa forma, a alta capacidade térmica que esse fluido apresenta, atrelada a pequena queda de pressão (tendo em vista as dimensões nanométricas das partículas), resultará em um incremento da eficiência do sistema (ELTAWHEEL; ABDEL-REHIM, 2020).

A preparação do nanofluido é considerada um parâmetro primordial na eficiência do mesmo, conferindo ao fluido estabilidade e livrando-o de deposições, apesar do tempo de uso. Duas técnicas podem ser empregadas para a preparação, sendo elas: *Método de Etapa Única*, quando as nanopartículas são sintetizadas e espalhadas no fluido base de forma simultânea; e, *Método de Duas Etapas*, onde as nanopartículas são preparadas por métodos mecânicos ou químicos, e, então, misturadas ao fluido base através de técnicas como vibradores ultrassônicos ou agitação magnética (ELTAWHEEL; ABDEL-REHIM, 2020; GHORABAE et al., 2021).

Ghorabae et al. (2021) apresentaram em seu estudo diversos fatores que influenciam o desempenho dos nanofluidos, sendo eles:

- *Nanopartículas*: relacionado a condutividade térmica, morfologia e densidade do material que constitui as partículas, além das dimensões utilizadas;
- *Concentração de nanopartículas*: a maioria das pesquisas relata que um aumento desse fator resulta em um incremento na condutividade térmica do fluido, mas esse valor apresenta um nível ótimo, pois, a viscosidade também aumenta com o incremento da concentração. Dessa forma, é essencial analisar a concentração ideal para a aplicação desejada, visando controlar o aumento da viscosidade;
- *Fluido base*: o tipo de fluido base selecionado irá apresentar grande relação com a condutividade térmica do nanofluido;
- *Temperatura*: pesquisas demonstram que, com aumento da temperatura, a condutividade térmica será melhorada. Esse fato é uma vantagem do nanofluido sobre fluidos convencionais, pois, em uma condição de aumento de carga térmica do sistema, o nanofluido irá tender a melhorar suas características;
- *Surfactantes*: utilizados na preparação visando aumentar a dispersão e diminuir a agregação das nanopartículas. Diversos estudos demonstram os efeitos diretos do gênero e da quantidade de surfactante no tempo de estabilidade e nas propriedades termofísicas dos nanofluidos.

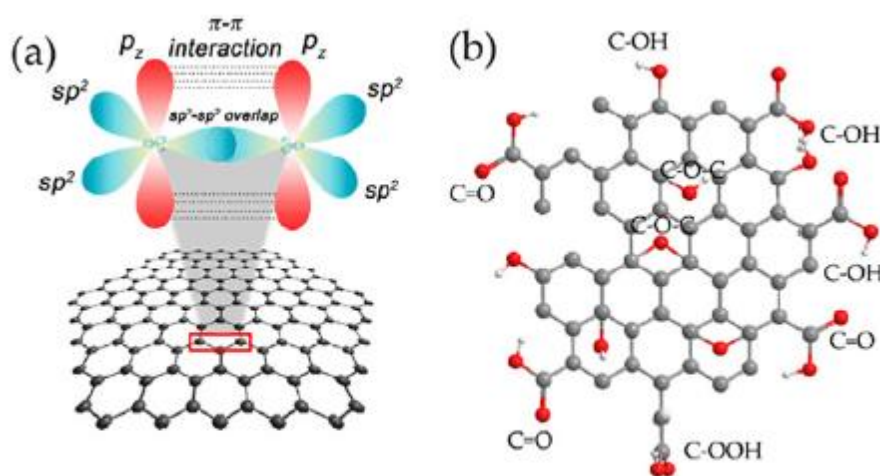
Os nanofluidos possuem várias aplicações em setores industriais, em resfriamento de componentes eletroeletrônicos, gerenciamento térmico de veículos, refrigeradores domésticos, fluido refrigerante em usinagem, aquecimento solar de

água, trocadores de calor, termossifões e/ou tubos de calor, reatores nucleares e baterias. O avanço da nanociência possibilita, para o meio industrial, grandes desenvolvimentos em relação ao meio ambiente, economia de energia e aumento de capacidade (GHORABAEI et al., 2021).

Nos últimos anos, muitas pesquisas analisaram o uso de materiais nanoestruturados à base de carbono para a preparação de nanofluidos, tendo em vista a alta condutividade térmica intrínseca e baixa densidade, se comparado a metais ou óxidos metálicos (ANIN VINCELY; NATARAJAN, 2016). Novoselov et al. (2004) relataram em seu estudo a descoberta do grafeno, o qual compõe-se de uma folha plana de átomos de carbono com hibridização  $sp^2$ , apresentando a espessura de um átomo e organizando-se na forma de uma estrutura favo de mel, conforme representado na Figura 4(a).

O óxido de grafeno (GO, do inglês *graphene oxido*) pode ser definido como uma forma quimicamente modificada do grafeno, sintetizado através de esfoliação e oxidação, além de uma extensa modificação oxidativa do plano basal. Dessa forma, o óxido de grafeno demonstra-se um material monocamada 2D com grande conteúdo de oxigênio, tornando-o hidrofílico para dispersões em meio aquoso, diferentemente do grafeno, que é hidrofóbico. O óxido de grafeno tem atraído crescentes interesses, tendo em vista suas propriedades, sendo: estabilidade mecânica, grande área de superfície, recursos óticos e elétricos controláveis. A Figura 4(b) representa a estrutura típica do óxido de grafeno (BAHIRAEI; HESHMATIAN, 2019).

**Figura 4: (a) estrutura do grafeno e (b) estrutura do óxido de grafeno**



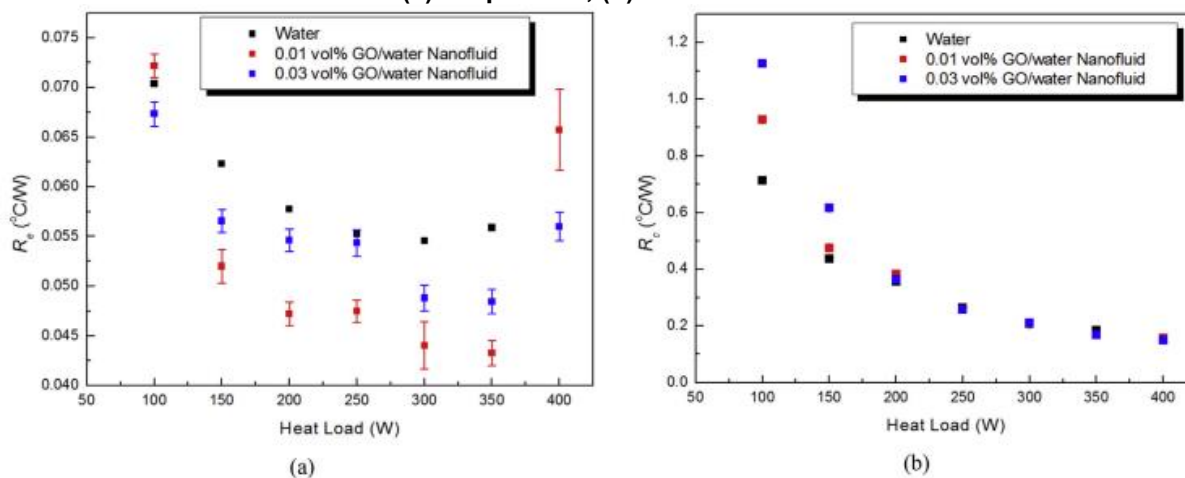
Fonte: Adaptado de Bahiraei e Heshmatian (2019)

## 2.3 Estado da arte

Azizi *et al.* (2013) investigaram o desempenho de um termossifão com nanofluido de óxido de grafeno como fluido de trabalho. As nanopartículas de grafeno empregadas na síntese apresentaram uma espessura de 4nm a 20nm e comprimento de 5 $\mu$ m a 10 $\mu$ m, e, goma arábica (GA) foi usada como o surfactante, visando aumentar a estabilidade do fluido. Várias concentrações em peso foram testadas, de 0,02% a 1%, além de variações na potência dissipada no evaporador, de 30W a 150W. Algumas conclusões apresentadas pelo estudo: para todas as concentrações de nanofluidos de óxido de grafeno, o aumento da potência dissipada reduziu a resistência térmica do sistema, porém, a menor resistência foi relatada para a concentração de 1% em peso; com aumento da potência dissipada e da concentração de nanopartículas, o coeficiente geral de transferência de calor do termossifão foi aprimorado. Além disso, a eficiência térmica do dispositivo passivo também aumentou, registrando o valor de 90,2%, para a configuração com concentração de 1% em peso e carga térmica de 120W, enquanto que a água, para a mesma dissipação de potência, apresentou um valor de eficiência de aproximadamente 81,5%. Dessa forma, o nanofluido de óxido de grafeno pode ser considerado como uma nova geração de fluido de trabalho para sistemas de transferência de calor.

Kim e Bang (2016) apresentaram em seu estudo os efeitos do nanofluido de óxido de grafeno, com concentrações volumétricas de 0,01% e 0,03%, em tubos de calor de aço inoxidável. O dispositivo passivo de transferência de calor apresentava uma estrutura capilar de camada única com *mesh* #100, o comprimento total de 1000mm, diâmetro externo e interno iguais a 25,4mm e 22,0mm, respectivamente. A razão de preenchimento durante os testes experimentais foi de 100%, o evaporador foi aquecido gradualmente em um intervalo de 100W a 400W e o resfriamento do condensador ocorreu através da passagem de água a 10°C com uma vazão mássica de 0,134kg/s por uma estrutura de camisa d'água. Pode ser verificado que os tubos de calor com nanofluidos apresentaram uma diminuição na resistência térmica do evaporador em cerca de 25%, quando comparados com a água como fluido de trabalho. Entretanto, em ambos os casos a resistência térmica do condensador manteve-se similar, como pode ser observado no Gráfico 1.

**Gráfico 1: Resistência térmica de cada seção conforme a entrada de calor:  
(a) evaporador, (b) condensador**



A partir dos resultados experimentais, os autores apresentaram as seguintes conclusões: os valores da resistência térmica do evaporador dos tubos de calor preenchidos com nanofluido de óxido de grafeno foram menores do que quando água foi utilizada como fluido de trabalho, devido à camada revestida de nanopartículas na estrutura capilar, a qual formou superfícies hidrofóbicas e modificou o raio capilar efetivo, resultando em um aumento do escoamento de líquido através da malha; o nanofluido com concentração volumétrica de 0,03% apresentou menor transferência de calor do que o 0,01% vol. devido à diminuição da permeabilidade da estrutura capilar.

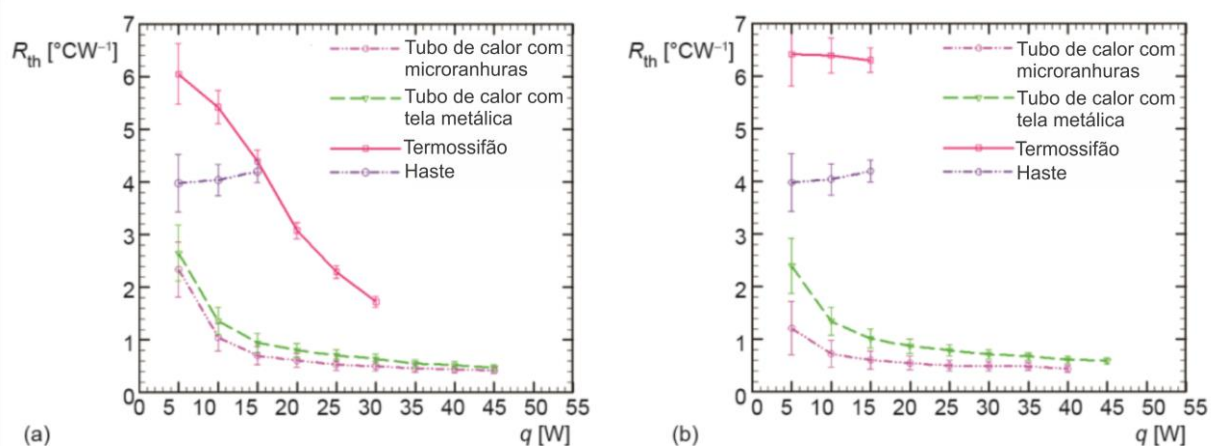
Nazari *et al.* (2018) investigaram o desempenho térmico de tubos de calor pulsantes (do inglês, *pulsating heat pipes*), amplamente empregados em dispositivos eletroeletrônicos e sistemas de energia, aplicando nanofluido de óxido de grafeno como fluido de trabalho. Durante os experimentos, foram utilizadas quatro concentrações diferentes para o nanofluido (0,25g/L, 0,50g/L, 1,00g/L e 1,50g/L), com razão de preenchimento de 50%. Ao adicionar o óxido de grafeno, foi observado um aumento na condutividade térmica e na viscosidade dinâmica do fluido. Para a carga térmica de 10W no dispositivo, com concentração de 0,25g/L do nanofluido, a resistência térmica do tubo de calor apresentou uma redução em mais de 40%, em comparação à água como fluido de trabalho. Entretanto, foi observado que, com o aumento da concentração de nanopartículas, reduz-se o desempenho térmico do sistema estudado, fato atribuído ao aumento da viscosidade dinâmica do fluido de trabalho.



Krambeck et al. (2019) compararam experimentalmente o desempenho térmico de diferentes dispositivos passivos de transferência de calor: uma haste, obtida a partir de uma barra maciça de cobre; um termossifão; um tubo de calor com tela metálica de bronze fosforoso *mesh* #100 como estrutura capilar; e, um tubo de calor com 32 microranhuras feitas através de usinagem por descarga elétrica (Wire-EDM, do inglês *Wire Electrical Discharge Machining*).

Para os experimentos, o termossifão e os tubos de calor foram construídos em cobre com diâmetros externos e internos de 9,45mm e 7,75mm, respectivamente, e um comprimento total de 200mm, sendo 80mm de evaporador, 20mm de seção adiabática e 100mm de condensador. Para a haste, foi utilizada uma barra com diâmetro de 9,45mm, e os comprimentos das seções foram os mesmos descritos para os outros dispositivos passivos de transferência de calor. O fluido de trabalho, utilizado no termossifão e nos tubos de calor, foi água deionizada, e a razão de preenchimento utilizada foi de 60% do volume do evaporador. Para o procedimento experimental, a temperatura ambiente foi mantida em  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , convecção forçada com uma velocidade do ar de  $5,0\text{m/s} \pm 0,2\text{m/s}$  foi utilizada para resfriar o condensador, e os dispositivos foram testados em duas posições: vertical e horizontal. A carga térmica aplicada no evaporador variou entre 5W e 45 W, com intervalos crescentes de 5W. O Gráfico 2 apresenta os resultados obtidos pelos autores para a resistência térmica dos diferentes dispositivos, para as inclinações e cargas térmicas analisadas.

**Gráfico 2: Resistência térmica dos dispositivos passivos em Krambeck et al. (2019)**



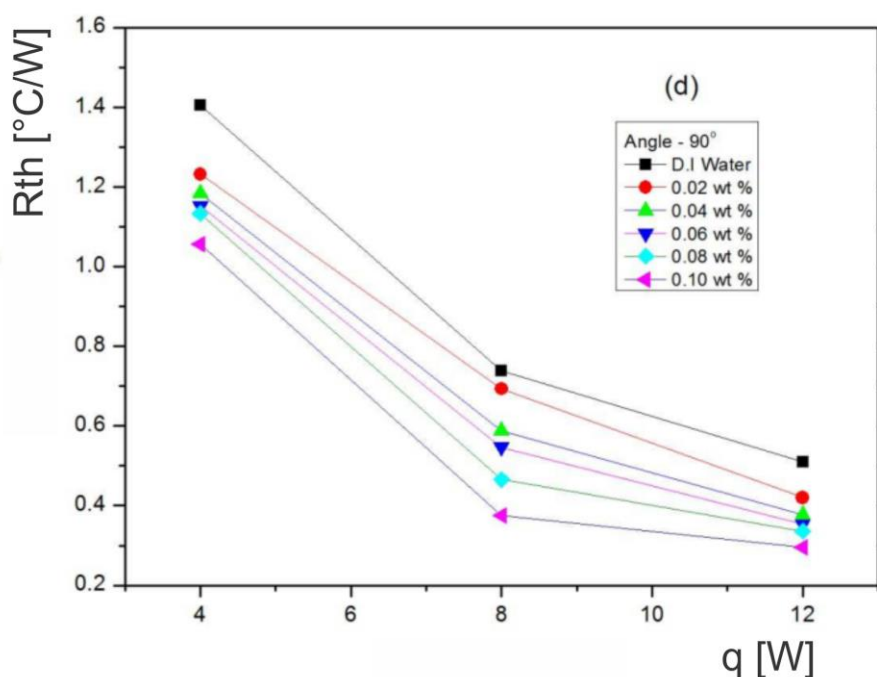
Fonte: Krambeck et al. (2019)

Através dos resultados experimentais, pode ser observado que a haste apresenta resistência térmica quase constante, enquanto que para o termossifão e os tubos de calor, as resistências térmicas diminuíram com o aumento da carga térmica na posição vertical. Na horizontal, os tubos de calor apresentam comportamento similar, entretanto, o termossifão mudou totalmente seu desempenho, devido a necessidade de força gravitacional para o retorno do fluido de trabalho ao evaporador. De acordo com Krambeck et al. (2019), os dispositivos passivos que utilizam da mudança de fase de um fluido de trabalho, possuem uma condutividade térmica efetiva maior, quando comparados a barra maciça (haste), e esse parâmetro aumenta com o incremento da potência dissipada.

Entre os dispositivos avaliados, os tubos de calor apresentaram melhor desempenho térmico, isso pode ser explicado pelo fato desses dispositivos utilizarem de forma conjunta o calor de vaporização do fluido de trabalho e a estrutura capilar, que facilita o escoamento do fluido no interior do dispositivo, principalmente para a posição horizontal. Dessa forma, os resultados apresentados por Krambeck et al. (2019) demonstram que esses dispositivos passivos através de mudança de fase são uma alternativa para o resfriamento de sistemas eletroeletrônicos.

Das et al. (2019) analisaram de forma experimental a utilização de nanofluido de grafeno, com concentrações de nanopartículas de 0,02%, 0,04%, 0,06%, 0,08% e 0,10% em peso, em um termossifão de cobre com 120mm de comprimento, onde 23 aletas radiais foram utilizadas para auxiliar o resfriamento por convecção natural do condensador. A temperatura ambiente durante os experimentos permaneceu em 25°C. As cargas térmicas aplicadas ao evaporador foram de 4W, 8W e 12W e diferentes ângulos de inclinação foram utilizados durante o estudo, sendo eles: 30°, 45°, 60° e 90°. O Gráfico 3 apresenta a resistência térmica do dispositivo em função da carga térmica e dos diferentes fluidos de trabalho utilizados, considerando a inclinação de 90° em relação à posição horizontal.

Gráfico 3: Resistência térmica do termossifão para 90° em Das et al. (2019)



Fonte: Das et al. (2019)

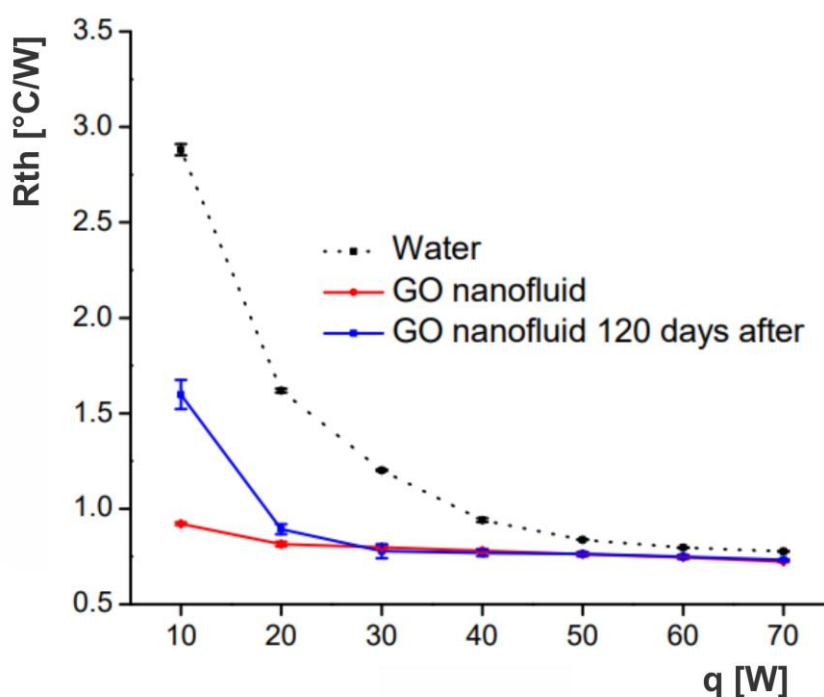
Os autores observaram que as resistências térmicas são praticamente iguais, independentemente dos ângulos de inclinação, e conforme pode ser observado no Gráfico 3, a partir do incremento da concentração de nanopartículas a resistência térmica do termossifão apresenta uma diminuição. Através do estudo, as seguintes conclusões foram apresentadas por Das et al. (2019): um aumento de até 29% na condutividade térmica do nanofluido de grafeno com concentração de 0,10% em peso, em comparação a água deionizada; o nanofluido apresenta um comportamento *Newtoniano*; a utilização de nanofluido de grafeno em termossifões indica uma diminuição na distribuição de temperaturas na parede e por consequência uma redução na resistência térmica do dispositivo.

Anand et al. (2020) compararam o desempenho de um termossifão utilizando o refrigerante hidrofluoroéter (HFE7000) e o nanorrefrigerante composto por nanopartículas de alumina ( $Al_2O_3$ ), dispersas no fluido base hidrofluoroéter. Diferentes concentrações volumétricas do nanorrefrigerante foram analisadas (0,025%, 0,050% e 0,075%), as quais apresentam boa estabilidade, sem sedimentações mesmo após 110 dias. Para todas as concentrações de nanopartículas, a resistência térmica do sistema apresentou uma diminuição. Para a concentração de 0,050%, foram encontrados os melhores resultados, obtendo queda de 80,9% na resistência térmica

e aumento de 40,5% no coeficiente de transferência de calor no evaporador, quando comparados com o refrigerante puro.

Herrera et al. (2021) compararam, de forma experimental, a utilização de água e de nanofluidos de óxido de grafeno em termossifões que compõem um sistema de recuperação de calor. Para os testes experimentais, o nanofluido foi sintetizado através de método eletroquímico, e, disperso em água deionizada, com uma concentração de 0,1% em peso. A razão de preenchimento dos dispositivos passivos de transferência de calor durante o experimento foi de 30%, com carga térmica variando entre 10W e 70W. No condensador foi utilizado água a uma temperatura de 25°C para realizar a dissipação do calor. O Gráfico 4 representa os valores obtidos para a resistência térmica durante os experimentos.

**Gráfico 4: Comparação da resistência térmica do termossifão com água e com nanofluido, de acordo com Herrera et al. (2021)**



Fonte: Herrera et al. (2021)

Os resultados em escala de laboratório demonstraram uma diminuição da resistência térmica do dispositivo passivo em até 67%, para a configuração com nanofluido de óxido de grafeno combinadas a cargas térmicas baixas. Entretanto, para cargas térmicas superiores a 40W, a resistência térmica do termossifão com ambos os fluidos de trabalho se apresentou de forma semelhante. Além disso, foi descrito o comportamento do nanofluido 120 dias após a avaliação inicial, onde o sistema

apresentou um aumento na resistência térmica para baixas cargas térmicas, sendo esse, atribuído a uma deposição maciça de nanopartículas na parede interna do termossifão. Porém, os resultados demonstram que sistemas trabalhando com nanofluido de óxido de grafeno podem manter um desempenho adequado mesmo após um longo tempo sem operação.

### **3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

Nesta seção são apresentados em detalhes as características dos termossifões e tubos de calor analisados, o processo de síntese do nanofluido de óxido de grafeno, os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento desse estudo experimental.

#### **3.1 Descrição do problema**

Para a presente investigação experimental foram construídos termossifões e tubos de calor em configurações de acordo com Aguiar (2016) e Krambeck (2016), respectivamente. Em ambos os dispositivos passivos de transferência de calor 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 crescente e duas diferentes inclinações de operação.

#### **3.2 Construção dos termossifões e tubos de calor**

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

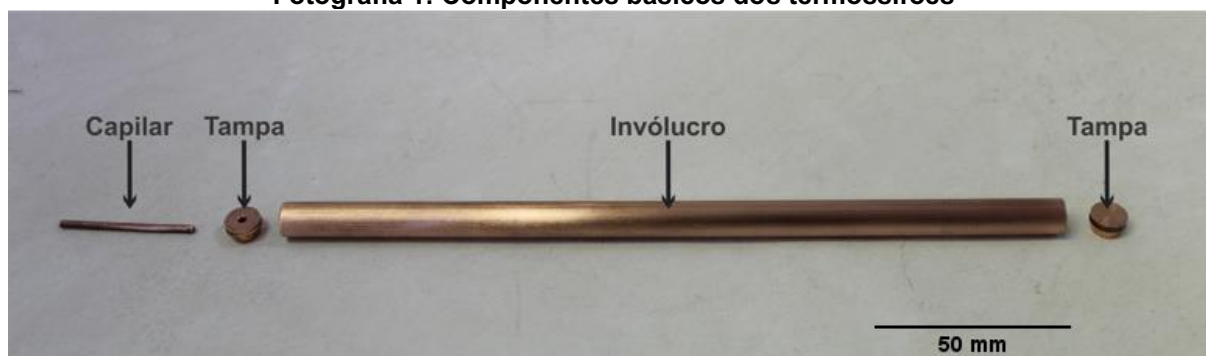
A metodologia utilizada no processo de construção desses dispositivos (limpeza, montagem, teste de estanqueidade, procedimento de evacuação e preenchimento com fluido de trabalho), na montagem do aparato experimental e no procedimento experimental foi baseada em Antonini Alves et al. (2018).

##### **3.2.1 Características dos Termossifões e Tubos de Calor**

Ambos 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. Para os tubos de calor, foram utilizadas telas metálicas de bronze fosforoso *mesh* #130 como estrutura capilar. A Fotografia 1 demonstra os componentes básicos dos termossifões.

**Fotografia 1: Componentes básicos dos termossifões**



Fonte: Autoria própria (2022)

Os termossifões e tubos de calor 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 do evaporador, e, de acordo com Krambeck (2016), a razão de preenchimento ideal para o tubo de calor contendo tela metálica como estrutura capilar é de 60% do volume do evaporador. Os fluidos de trabalho utilizados foram água destilada e nanofluidos de óxido de grafeno com concentrações volumétricas de 5,0% (GO 5,0%) e de 2,5% (GO 2,5%). A Tabela 1 apresenta as principais características dos dispositivos passivos de transferência de calor utilizados na presente investigação experimental.

**Tabela 1: Características estruturais dos termossifões e tubos de calor**

Característica	Termossifões	Tubos de Calor
Diâmetro interno [mm]	7,75	7,75
Diâmetro externo [mm]	9,45	9,45
Comprimento do Evaporador [mm]	80	80
Comprimento da Seção Adiabática [mm]	20	20
Comprimento do Condensador [mm]	100	100
Razão de Preenchimento [%]	40	60
Estrutura capilar	Inexistente	Tela metálica
Fluidos de trabalho	Água, GO 5,0% e GO 2,5%	Água e GO 2,5%

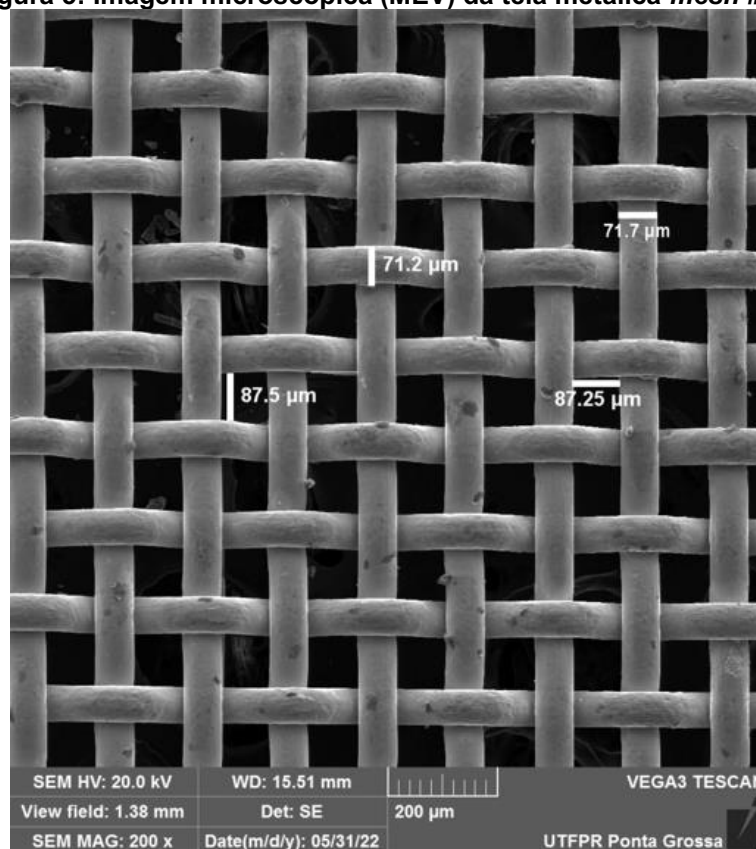
Fonte: Autoria própria (2022)

A estrutura capilar interna dos tubos de calor foi constituída por uma camada única de tela metálica de bronze fosforoso *mesh* #130. A análise dessa tela metálica

foi realizada através de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), onde o princípio de funcionamento consiste em um feixe de elétrons, que é disparado continuamente sobre a amostra, realizando uma varredura ponto a ponto, por linhas sucessivas. O equipamento apresenta um detector, capaz de analisar as energias dos elétrons durante a interação com a superfície. A partir da interpretação dessas energias, que pode ser realizada de duas formas: elétrons secundários ou elétrons retroespalhados, o equipamento gera as imagens (DEDAVID et al., 2007).

No presente estudo, as imagens foram geradas por elétrons secundários, que são considerados de baixa energia. Nesse caso, as imagens são formadas pela excitação dos elétrons presentes nas camadas mais externas dos átomos da amostra, e, o contraste é dado, sobretudo, pelo relevo da amostra (DEDAVID et al., 2007). A Figura 5 mostra a imagem obtida com ampliação de 200 vezes para a estrutura capilar previamente aos testes experimentais nos tubos de calor. Essa imagem foi obtida no Laboratório de Caracterização de Materiais do DAMEC/UTFPR/Ponta Grossa através de um MEV *Vega3 Tescan*<sup>TM</sup>.

**Figura 5: Imagem microscópica (MEV) da tela metálica *mesh* #130**



**Fonte: Autoria própria (2022)**



A Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) foi utilizada para detectar os elementos químicos na amostra, e, posteriormente aos testes experimentais com nanofluido de óxido de grafeno, visando analisar possíveis incrustações na estrutura capilar. Essa técnica é realizada através de um analisador de Raio X, acoplado ao MEV, e, é baseada no princípio de que cada elemento químico libera fótons, com frequências eletromagnéticas específicas, no momento que o feixe de elétrons do equipamento colide com a superfície da amostra. Dessa forma, obtém-se um espectro de energia *versus* intensidade relativa dos picos (DEDAVID et al., 2007). Os resultados da análise EDS para a tela metálica, antes do início dos testes experimentais, encontram-se no Apêndice A. Essa análise também foi realizada no MEV *Vega3 Tescan™* pertencente ao Laboratório de Caracterização de Materiais.

### 3.2.2 Procedimento de Limpeza

A limpeza dos componentes dos termossifões e tubos de calor é necessária a fim de garantir a molhabilidade do fluido de trabalho e a eliminação de impurezas, além de melhorar a qualidade do vácuo (KRAMBECK, 2016).

Portanto, todos os componentes dos dispositivos passivos de transferência de calor foram colocados em um banho ultrassônico *Kondentech™*, contendo acetona por um intervalo de 20 minutos, com temperatura ajustada a 40°C (Fotografia 2). Após essa etapa, os invólucros, tampas e capilares foram imersos primeiramente em álcool etílico e, em sequência, em solução com concentração de 10% de volume de ácido sulfúrico, visando eliminar quaisquer sujidades que ainda podiam estar presentes.

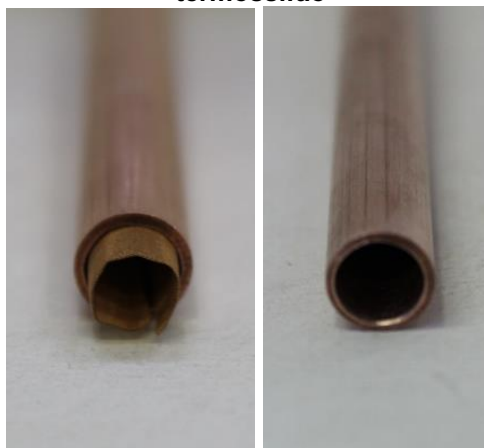
**Fotografia 2: Banho ultrassônico**

Fonte: Autoria própria (2022)

### 3.2.3 Montagem dos Termossifões e Tubos de Calor

Para os tubos de calor, primeiramente, foi realizada a inserção da tela metálica *mesh* #130, de forma a gerar uma camada única em todo o comprimento interno do invólucro, conforme apresenta a Fotografia 3(a); deve-se evitar, durante esse processo, que a tela dobre, ou, até mesmo, rasgue em algum ponto, fatos que iriam atrapalhar o funcionamento da estrutura capilar prejudicando o bombeamento capilar. Na Figura 3(b) é mostrado o invólucro dos termossifões.

**Fotografia 3: (a) Inserção da tela metálica no invólucro do tubo de calor, (b) interior do termossifão**



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2022)

Em seguida, o procedimento de montagem dos dispositivos passivos seguiu de forma similar, com a soldagem das tampas e capilares, a partir do auxílio de um ferro para solda do tipo machadinha *Hikari*<sup>TM</sup> AX320. As peças foram brasadas, utilizando como material de adição uma liga de estanho. A Fotografia 4 mostra um tubo de calor após o procedimento descrito.

**Fotografia 4: Tubo de calor construído**

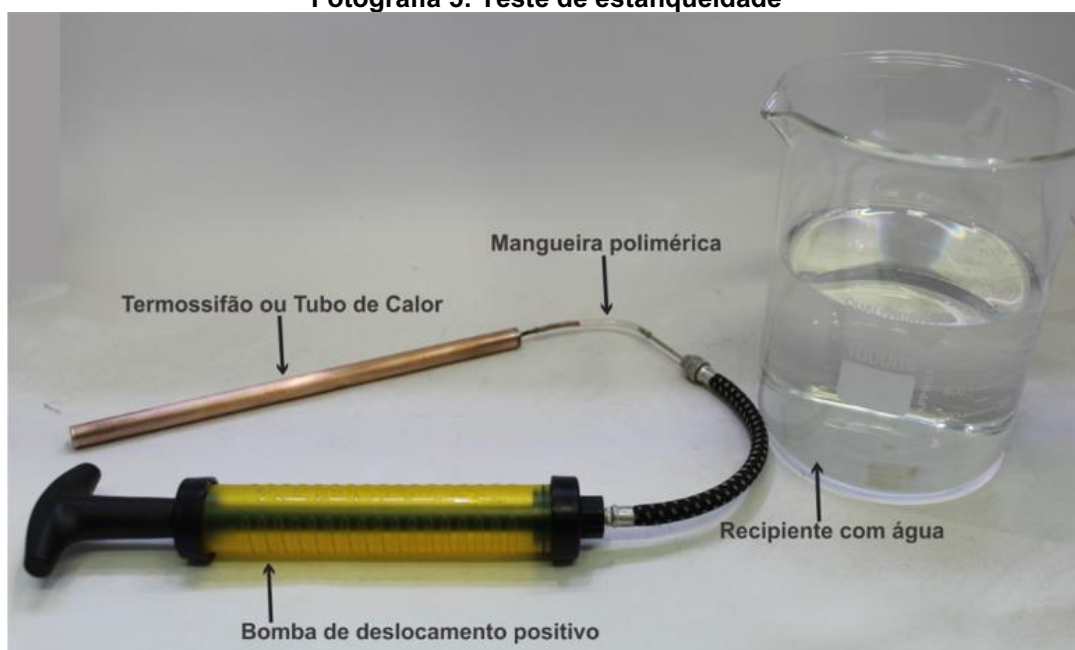


Fonte: Autoria própria (2022)

### 3.2.4 Teste de Estanqueidade

Visando evitar ocorrência de erros, foi realizada a verificação do processo de soldagem, submetendo os dispositivos montados a um teste de estanqueidade, com uma bomba de deslocamento positivo manual, uma mangueira de polímero, para possibilitar a conexão entre a bomba e o capilar, e um recipiente com água, como demonstrado na Fotografia 5.

**Fotografia 5: Teste de estanqueidade**



Fonte: Autoria própria (2022)

Os termossifões e tubos de calor foram colocados no recipiente com água, e, então, ar foi bombeado através da bomba de deslocamento positivo para dentro deles. Caso aparecessem bolhas nas soldas, demonstrariam falhas, que impossibilitam a operação dos dispositivos passivos de transferência de calor. Dessa forma, seria necessário a desmontagem, limpeza, montagem, solda e realização do teste de estanqueidade, até a verificação de que não houvesse nenhum vazamento pelas soldas realizadas.

### 3.2.5 Procedimento de Evacuação

O procedimento de evacuação aconteceu através de uma bomba de vácuo *EOS Value™*, modelo i260SV. O termossifão e/ou tubo de calor foi conectado pelo seu capilar a uma mangueira polimérica, ligada a uma válvula de controle de fluxo e a uma mangueira flexível de borracha, permitindo assim a conexão necessária com a bomba de vácuo, conforme ilustra a Fotografia 6. Para evitar possíveis vazamentos nos acoplamentos entre a mangueira polimérica, uma graxa de alto vácuo *Dow Corning™* foi utilizada.

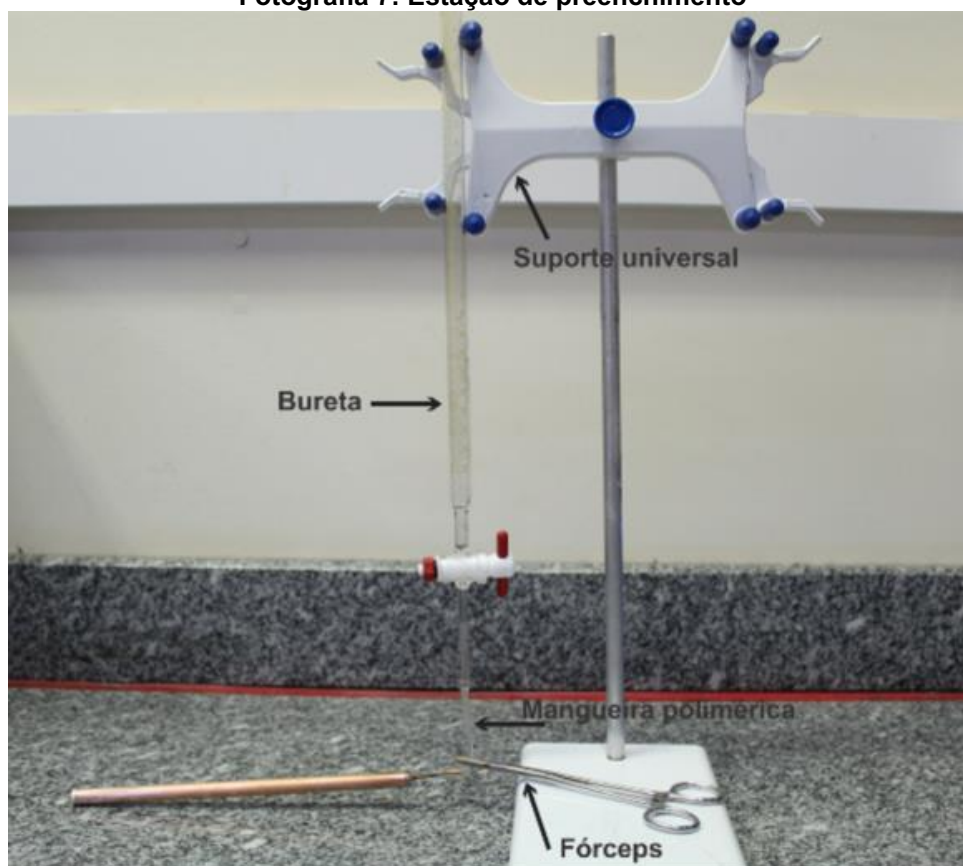


A bomba de vácuo permaneceu ligada por um período de 8 horas. Após esse tempo, o vacuômetro da bomba indicou uma pressão manométrica interna de 9kPa. Para o procedimento seguinte, de preenchimento, foi realizada a interrupção do fluxo na mangueira polimérica, com auxílio de um *fôrceps*, para evitar a entrada de ar, e, então, a bomba de vácuo foi desligada.

### 3.2.6 Preenchimento dos Termossifões e Tubos de Calor com Fluido de Trabalho

Para o preenchimento dos dispositivos passivos com os diferentes fluidos de trabalho, foi utilizada uma pequena estação de preenchimento, composta por um suporte universal, uma bureta graduada, com escala de 0,1mL e capacidade de 25mL, um *fôrceps* e uma mangueira polimérica, fazendo a conexão do tubo evacuado com a bureta. A Fotografia 7 apresenta o esquema descrito.

Fotografia 7: Estação de preenchimento



Fonte: Autoria própria (2022)

Antes de realizar a conexão da mangueira polimérica com a bureta, foi necessário certificar que a mesma estivesse preenchida com fluido de trabalho e sem bolhas, evitando a entrada de ar no invólucro evacuado. Com a bureta completamente cheia de fluido de trabalho, e as conexões realizadas, a válvula da bureta foi aberta vagarosamente, liberando o *fórceps* cautelosamente, possibilitando a entrada do fluido de trabalho no dispositivo a ser preenchido. Os termossifões foram carregados com 1,51mL, e os tubos de calor, com 2,26mL, valores correspondentes as suas respectivas razões de preenchimento ideais, 40% (AGUIAR, 2016) e 60% (KRAMBECK, 2016).

Após o preenchimento com a quantidade de fluido de trabalho desejada nos dispositivos passivos, o *fórceps* foi fechado, o capilar de cobre foi conformado (crimpagem), com auxílio de um alicate de pressão, bloqueando a possibilidade de entrada de ar no invólucro. Posteriormente, o capilar foi brasado com estanho, conforme ilustra a Fotografia 8, completando, assim, a vedação dos termossifões e/ou tubos de calor.

**Fotografia 8: Brasagem do capilar**



**Fonte: A autoria própria (2022)**

### **3.3 Nanofluido de óxido de grafeno**

Na presente seção é descrito o método de síntese do nanofluido de óxido de grafeno e o procedimento adotado para a sua caracterização.

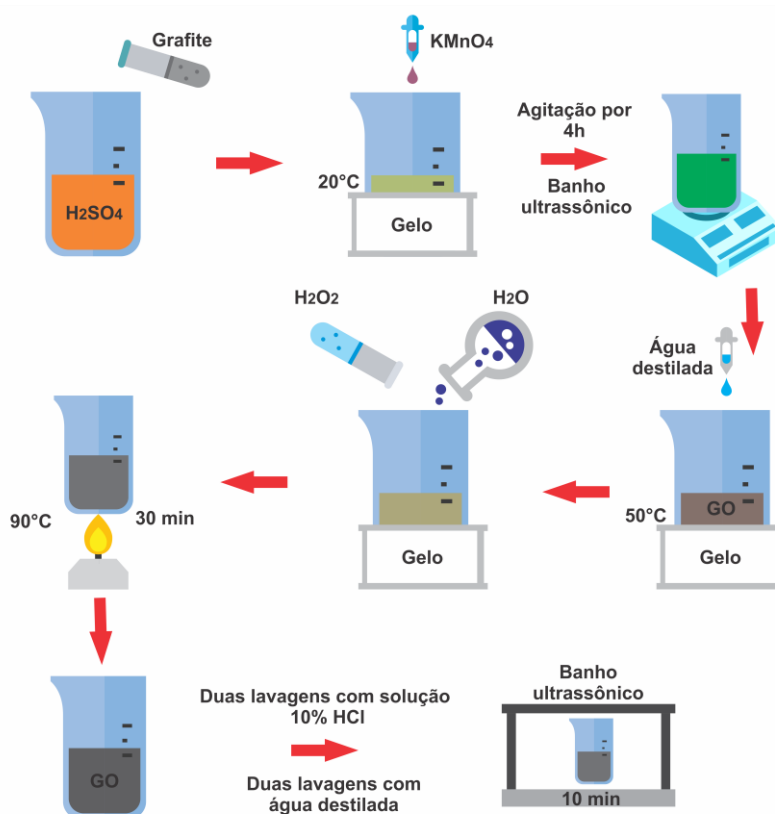


### 3.3.1 Síntese do Nanofluido de Óxido de Grafeno

Nos testes experimentais foi utilizado nanofluido de óxido de grafeno, com concentrações volumétricas de 5,0% e 2,5%; o qual, 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 ( $\text{NaNO}_3$ ), chamada Síntese *Eco-friendly* ou Método de *Hummers* modificado. A sintetização do óxido de grafeno foi executada no Laboratório de Sistemas Nanoestruturados (Lab SisNano) do Departamento Acadêmico de Física (DAFIS) da UTFPR/Ponta Grossa.

A Figura 6 apresenta o procedimento de síntese realizado, iniciando pela adição de 1g de pó de grafite em 25 mL de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Feito isso, foi inserido, de forma vagarosa, 3g de permanganato de potássio ( $\text{KMnO}_4$ ), sob agitação em banho de gelo, com temperatura mantida em torno de  $20^\circ\text{C}$ . A mistura foi colocada em agitação por 4h. Para aumentar o grau de esfoliação, a cada intervalo de 30 minutos, a mistura permaneceu 10 minutos em banho ultrassônico. A coloração resultante desses processos assemelha-se a um verde escuro.

**Figura 6: Procedimento de síntese do nanofluido de óxido de grafeno**



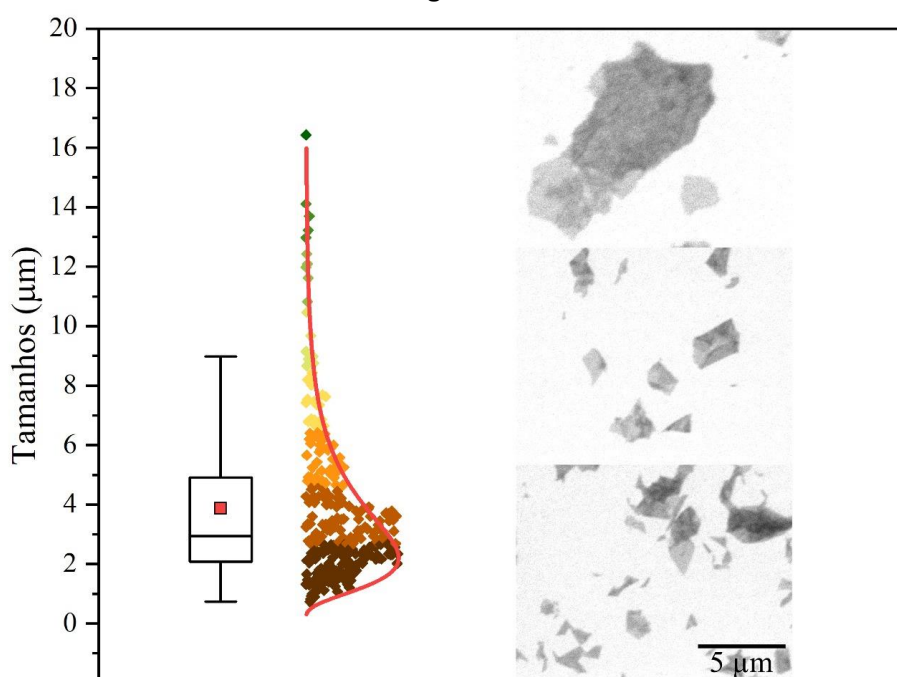
Fonte: Autoria própria (2022)

Posteriormente, a reação foi colocada em banho de gelo. Lentamente, 50mL de água destilada foram gotejados, mantendo a temperatura abaixo de 50°C. A cor resultante foi marrom escura, o que indica a formação de óxido de grafeno. Na sequência, 100 mL de água foram adicionados rapidamente, com o intuito de oxidar o grafite restante. Visando remover o excesso de permanganato de potássio, 5 mL de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) foram acrescentados, de forma gradual, resultando em uma coloração marrom clara.

Na etapa seguinte, o banho de gelo foi retirado e o aquecimento da reação até 90°C, por 30 minutos, foi realizado. Com esse processo, a reação escurece. Após esfriar, foi necessário executar duas lavagens, com solução de 10% de ácido clorídrico (HCl), e, duas lavagens com água destilada. O procedimento foi finalizado com banho ultrassônico de 10 minutos.

A Figura 7 apresenta a distribuição dos comprimentos das folhas de óxido de grafeno, a partir de análise com imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) obtidas no Laboratório de Caracterização de Materiais. Através do ajuste de uma função *log-normal*, foi encontrado o valor médio de 2,90μm e um desvio padrão logaritmo de 0,55 para as folhas produzidas.

**Figura 7: Distribuição dos comprimentos e imagens microscópicas (MEV) das folhas de óxido de grafeno**



Fonte: Dimbarre (2021)



### 3.3.2 Caracterização do Nanofluido de Óxido de Grafeno

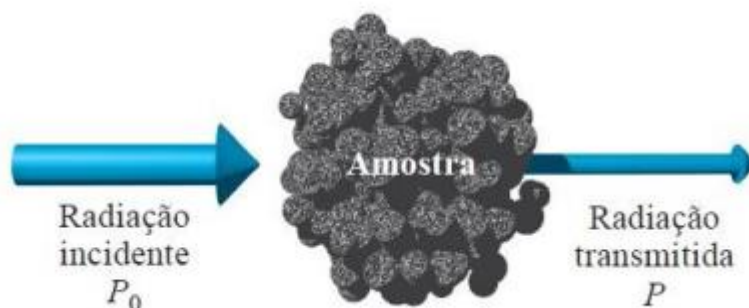
Para a caracterização do nanofluido de óxido de grafeno foi empregada a Técnica de Espectroscopia UV-Vis, que se baseia em medidas de absorção da quantidade de luz em função do comprimento de onda, nas regiões visível e ultravioleta do espectro, mediante o fato das moléculas apresentarem elétrons, os quais podem ser promovidos a níveis energéticos superiores em função da absorção de energia (ROSA et al., 2013).

A partir da incidência da luz sobre a matéria, podem ocorrer diferentes processos, como reflexão, absorção e/ou transmissão; esse último, pode ser descrito como a fração da radiação incidente transmitida pela solução, conforme ilustrado na Figura 8 e na Equação (1). A absorbância ( $A$ ) da solução relaciona-se de forma logarítmica com a transmitância ( $T$ ), conforme a Equação (2). Dessa forma, quando a absorbância da matéria aumenta, a transmitância reduz (DIAS et al., 2016; SKOOG et al., 2006).

$$T = \frac{P}{P_0}, \quad (1)$$

$$A = -\log_{10} T. \quad (2)$$

**Figura 8: Radiação incidente e transmitida sobre uma amostra**



Fonte: Skoog et al. (2006)

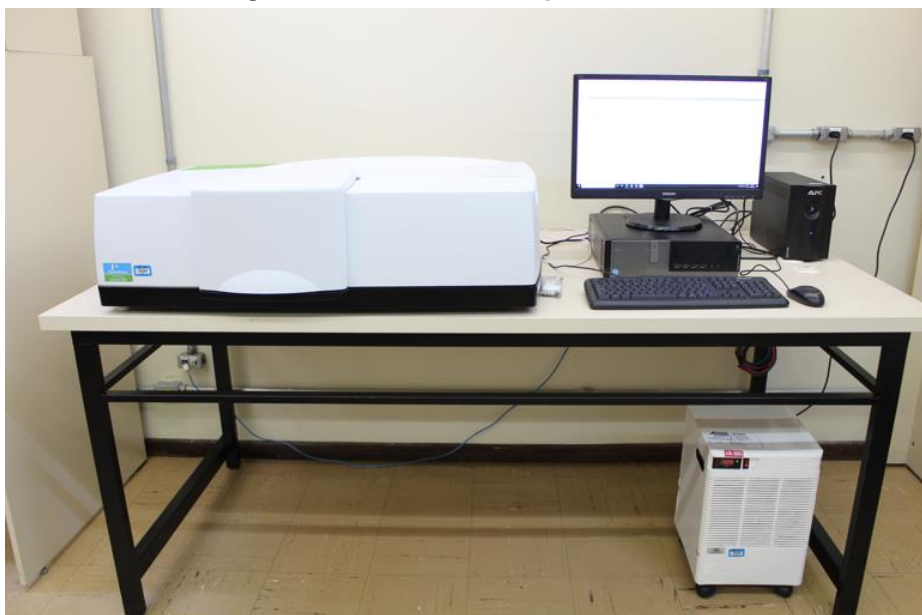
De acordo com a Lei de *Beer-Lambert*, a absorbância da amostra é diretamente proporcional a concentração do analito e ao caminho óptico do meio absorvente, como descrito na Equação (3).

$$A = \epsilon bc, \quad (3)$$

sendo que,  $\epsilon$  é o coeficiente de absorvidade molar da espécie [L/mol cm],  $b$  é o caminho óptico [cm] e  $c$  é a concentração molar da espécie [mol/L].

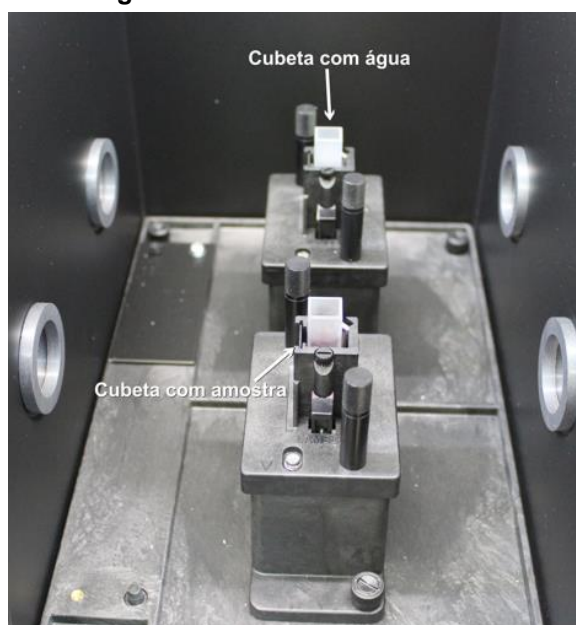
No presente estudo, para a caracterização do nanofluido de óxido de grafeno foi utilizado um espectrofotômetro *Perkin Elmer™ Lambda 850+* pertencente ao Laboratório de Sistemas Nanoestruturados (Lab SisNano) – Fotografia 9. A faixa de varredura foi de 200nm a 800nm. Foram utilizadas cubetas de quartzo, visto que, o vidro apresenta absorção para a faixa de comprimento de onda em análise.

**Fotografia 9: Bancada do espectrofotômetro**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

O primeiro procedimento adotado para o teste de caracterização do nanofluido foi a calibração do zero do equipamento, para o qual foi realizada uma varredura na faixa de interesse sem nenhuma cubeta no compartimento de análise. O espectrofotômetro conta com feixe duplo, permitindo a correção de variações na intensidade da luz. Para tal, foram utilizadas duas cubetas de quartzo de forma simultânea, a primeira com água (fluido base de referência) e a segunda com a amostra em análise (nanofluido de óxido de grafeno), esse procedimento pode ser observado na Fotografia 10.

**Fotografia 10: Cubetas com amostras**

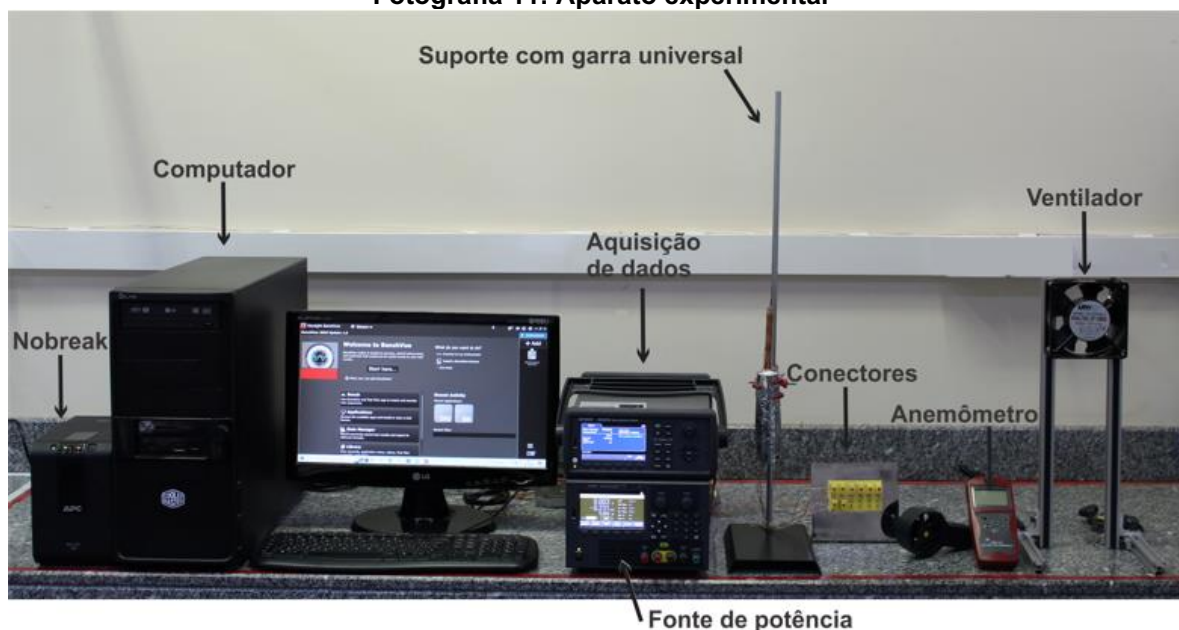
**Fonte: Autoria própria (2022)**

Sendo a escala máxima de absorvância do equipamento igual a 10, as amostras necessitaram de diluição em água destilada. Portanto, as análises foram realizadas em concentrações volumétricas de 0,25% e 0,50%, representativas, respectivamente, aos fluidos utilizados nos testes experimentais de concentrações iguais a 2,5% e 5,0%. Os testes foram realizados três vezes para cada concentração, com diferentes amostras.

### **3.4 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 *Ultrar™* e um anemômetro portátil *Itan™* 720, conforme ilustrado na Fotografia 11.

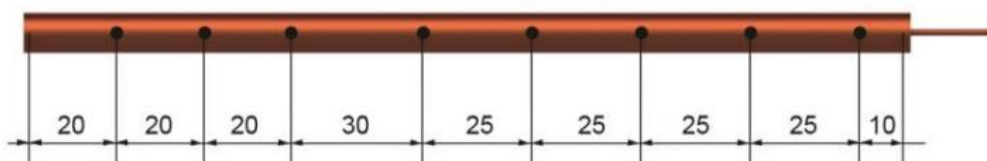
Fotografia 11: Aparato experimental



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, com as distâncias entre os sensores de temperatura representadas, em mm, na Figura 9. Os termopares foram fixados na parede externa dos invólucros dos termossifões e/ou tubos de calor com auxílio de uma fita adesiva termosensível *Kapton™*.

Figura 9: Posicionamento dos termopares em [mm]



Fonte: Krambeck *et al.* (2019)

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 (Fotografia 12). 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.

**Fotografia 12: Sistema de aquecimento**



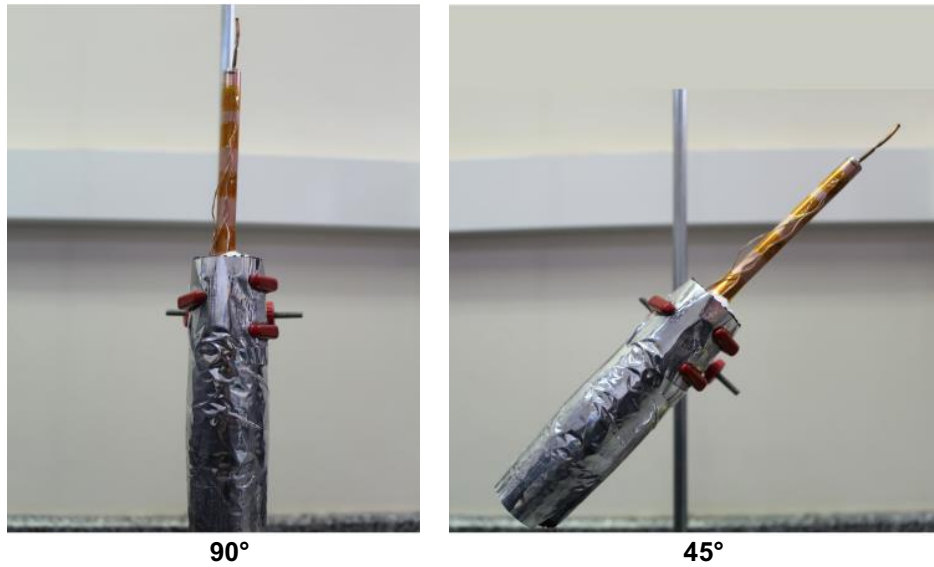
**Fonte: A autoria própria (2022)**

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.

### **3.5 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<sup>TM</sup>* em  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Os termossifões e/ou tubos de calor foram fixados, através da seção adiabática, ao suporte universal com garra, e, subsequentemente, foram ajustados em inclinações de  $90^{\circ}$  ou  $45^{\circ}$ , em relação a horizontal, sempre com o evaporador abaixo do condensador, como apresentado na Fotografia 13. 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  $5,0\text{m/s}$ , controlado através do anemômetro portátil, com erro de  $\pm 0,2\text{m/s}$ .

**Fotografia 13: Inclinações dos testes experimentais**



Fonte: Aatoria própria (2022)

Os testes experimentais foram repetidos três vezes, para os termossifões e tubos de calor, 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 quase 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™*.

### 3.6 Procedimento de cálculo

A resistência térmica global de um termossifão e/ou tubo de calor,  $R_{th}$ , é definida por Reay et al. (2014) 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:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{T_{evap} - T_{cond}}{q}, \quad (4)$$

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].

### 3.7 Análise de incertezas

Os resultados experimentais contêm uma incerteza de medição intrínseca dos equipamentos, a qual deve ser considerada para estimar o grau de desvio associado aos resultados obtidos (ISMAIL, 2000).

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™)*. Considerando  $\Delta R$  a incerteza relacionada a um resultado  $R = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , em função das variáveis  $x_1, \dots, x_n$ , de acordo com Kline e McClintock (1953), tem-se a Equação (5).

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \partial x_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \partial x_n\right)^2}, \quad (5)$$

A Tabela 2 apresenta os valores de incerteza experimental para os parâmetros utilizados nos cálculos de desempenho térmicos dos termossifões e tubos de calor. Os termopares utilizados no presente estudo foram fabricados e calibrados de acordo com a metodologia descrita por Machado (2022). Para os instrumentos com escala milimétrica, a incerteza foi considerada como sendo igual a metade da menor escala de leitura; e, para os demais equipamentos foram consideradas as incertezas presentes na literatura ou manuais fornecidos pelos fabricantes.

**Tabela 2: Incertezas experimentais**

Variável	Instrumento	Incerteza	Unidade
Temperatura	Termopar tipo K	±0,25	°C
Diâmetro	Paquímetro	±0,5	mm
Comprimento	Escala milimétrica	±0,5	mm
Carga térmica	Fonte de potência	±1%	W
Velocidade	Anemômetro portátil	±0,2	m/s

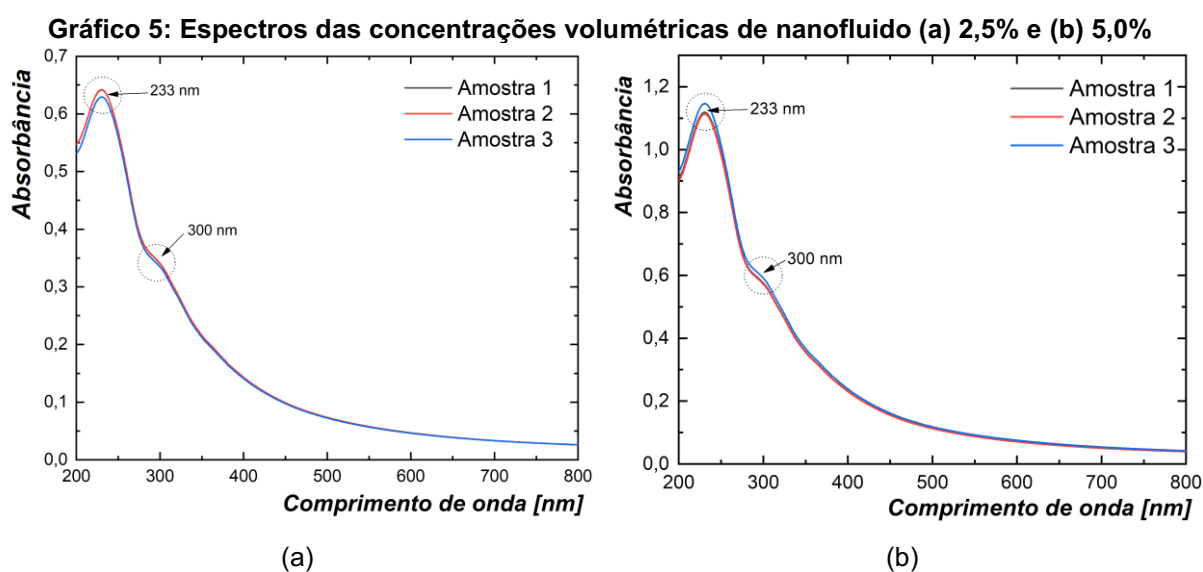
Fonte: Autoria própria (2022)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da caracterização do nanofluido de óxido de grafeno e os resultados experimentais de desempenho térmico dos termossifões e dos tubos de calor com os diferentes fluidos de trabalho operando em duas inclinações.

### 4.1 Caracterização do nanofluido de óxido de grafeno

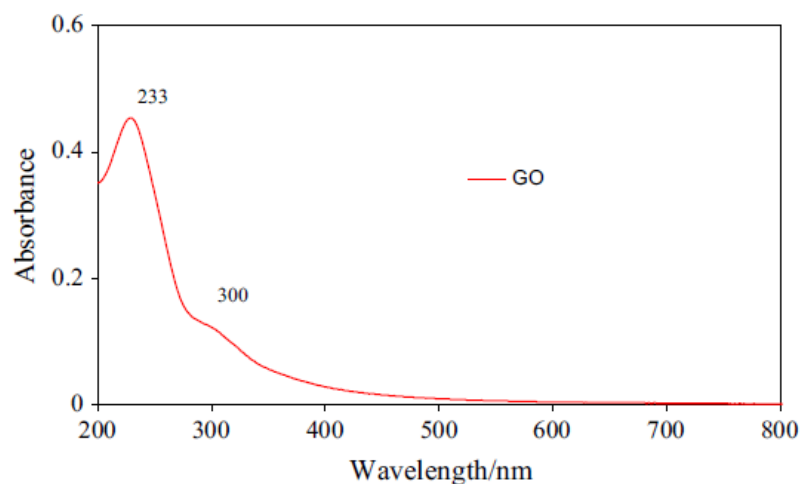
A análise por espectroscopia UV-Vis foi realizada visando identificar os nanofluidos de óxido de grafeno com concentrações volumétricas de 5,0% e 2,5% utilizados no presente estudo experimental. O Gráfico 5 apresenta os espectros de absorção obtidos para três amostras de cada nanofluido.



Fonte: Autoria própria (2022)

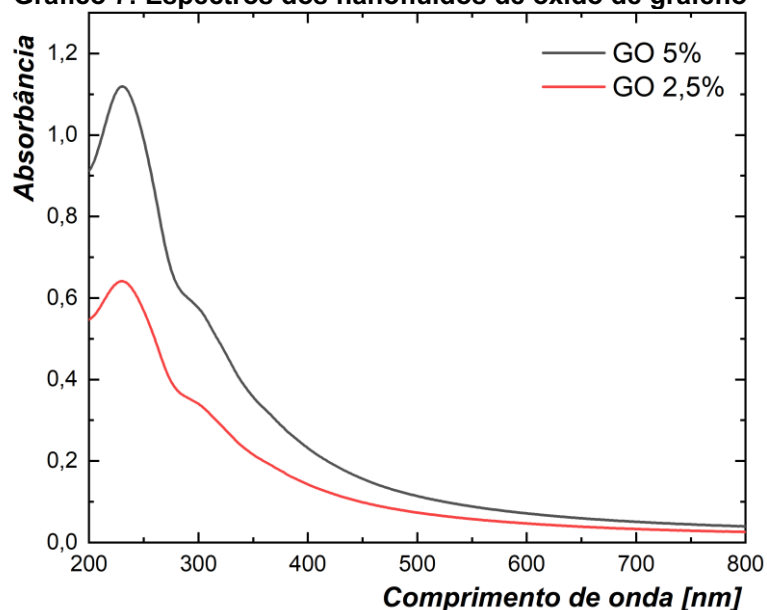
Keklikcioglu Cakmak (2019) descreve que o pico em 233nm corresponde às transições  $\pi \rightarrow \pi^*$  das ligações dos anéis aromáticos  $C = C$ , e, o pico observado próximo a 300nm ocorre devido às transições do tipo  $\eta \rightarrow \pi^*$ , atribuídas a ligações  $C = O$ . A presença dessas duas bandas características pode ser notada no Gráfico 6. Portanto, a partir dos Gráficos 5 e 6, é possível verificar que os nanofluidos utilizados no presente estudo experimental são de óxido de grafeno.



**Gráfico 6: Espectro do nanofluido de óxido de grafeno com concentração mássica de 0,1%**

Fonte: Keklikcioglu Cakmak (2019)

Além disso, de acordo com a Lei de *Beer-Lambert* (Equação (3)), tem-se que a absorbância é diretamente proporcional a concentração do analito. Em conformidade com esse fato, o Gráfico 7 apresenta os espectros para as diferentes concentrações volumétricas de nanofluido de óxido de grafeno. Pode ser observado valores maiores de absorbância para o nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 5,0% (GO 5,0%) em relação ao nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5% (GO 2,5%). Portanto, destaca-se a distinção experimental entre as concentrações de nanofluido de óxido de grafeno em estudo.

**Gráfico 7: Espectros dos nanofluidos de óxido de grafeno**

Fonte: Autoria própria (2022)

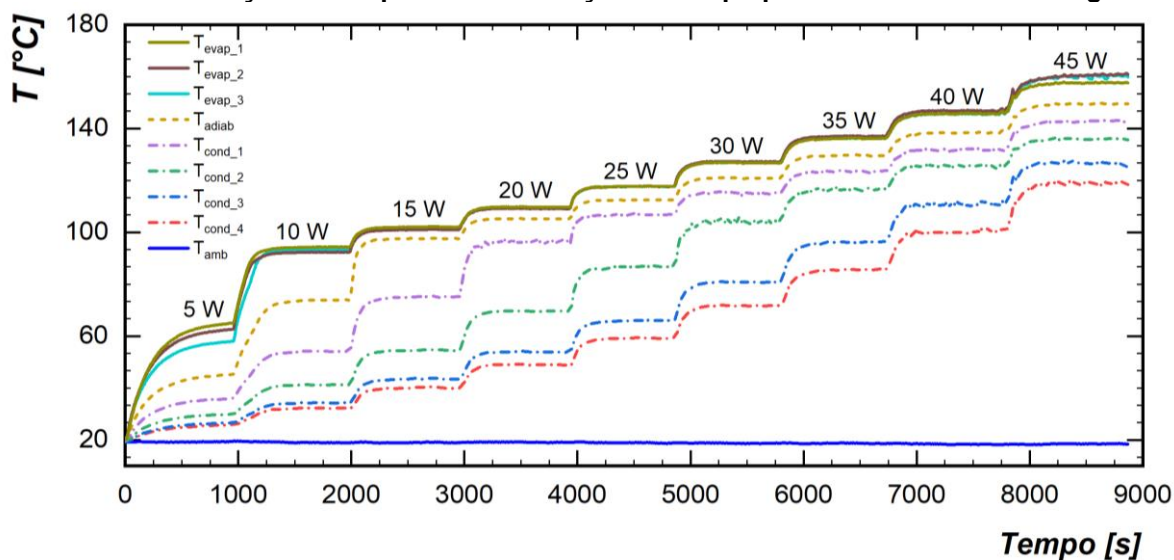
## 4.2 Termossifão

Na presente seção são apresentados e discutidos os resultados dos testes experimentais dos termossifões com os diferentes fluidos de trabalho, água destilada, nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 5,0% (GO 5,0%) e 2,5% (GO 2,5%), sob diferentes condições de carga térmica e inclinação de operação.

### 4.2.1 Termossifão com Água Destilada

A distribuição de temperatura em relação ao tempo, para os testes experimentais do termossifão contendo água destilada é apresentada no Gráfico 8. É possível verificar os diferentes valores de temperatura assumidos pelas regiões em função da potência dissipada, onde o evaporador apresenta os valores mais elevados, a seção adiabática com valor intermediário, e, o condensador, devido a ação de convecção forçada, com os menores valores. O dispositivo alcançou o regime quase permanente em torno de 700s, após a aplicação da primeira carga térmica.

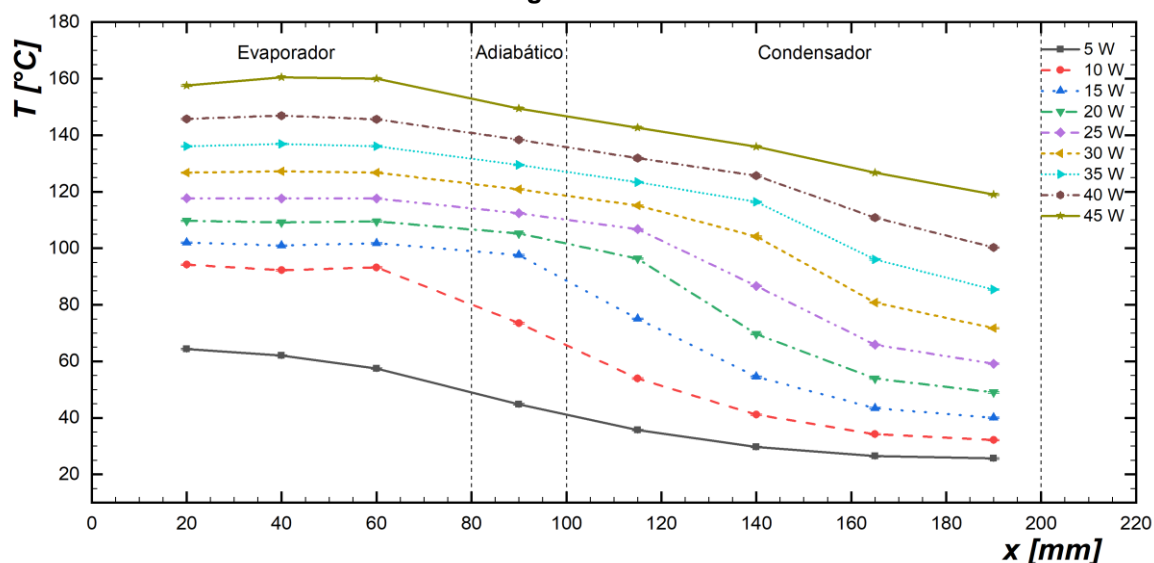
**Gráfico 8: Distribuição da temperatura em função do tempo para o termossifão com água a 90°**



Fonte: Autoria própria (2022)

O Gráfico 9 indica a distribuição de temperaturas em função do comprimento do termossifão contendo água como fluido de trabalho, a partir do qual pode ser observado um comportamento isotérmico no evaporador. Na região do condensador, os quatro termopares apresentaram um gradiente de temperatura.

**Gráfico 9: Distribuição da temperatura em função do comprimento para o termossifão com água a 90°**

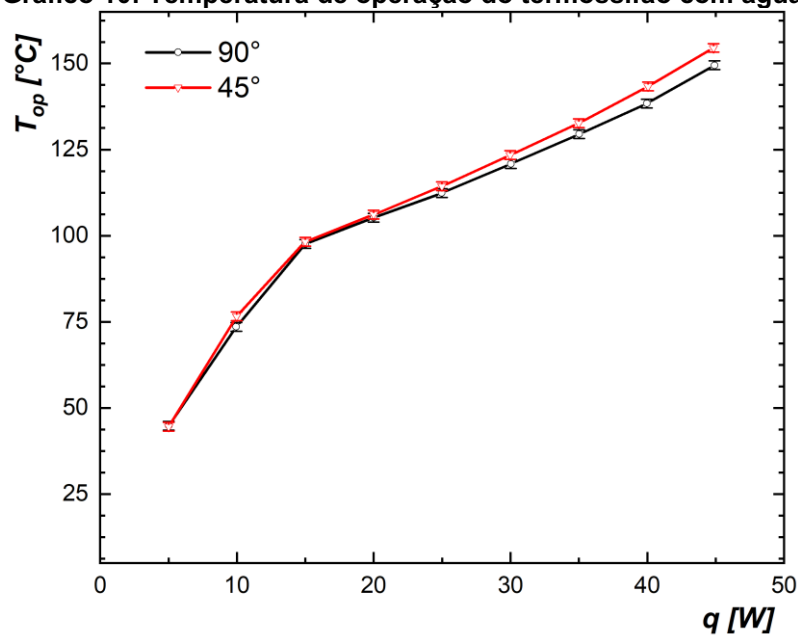


Fonte: Autoria própria (2022)

As curvas de distribuições de temperaturas em função do tempo e em função do comprimento do termossifão contendo água destilada como fluido de trabalho, para a inclinação de 45°, encontram-se no Apêndice B. Essas curvas apresentam um comportamento similar aos apresentados nos Gráficos 8 e 9.

O comparativo experimental do desempenho térmico do termossifão com água destilada, em função da inclinação de trabalho, é apresentado nos Gráficos 10 e 11, que correspondem, respectivamente, as temperaturas de operação e as resistências térmicas.

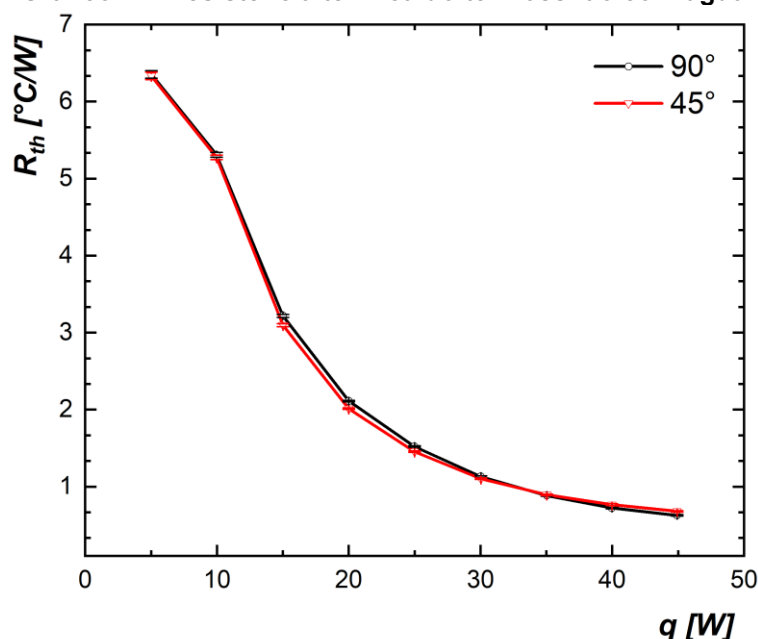
**Gráfico 10: Temperatura de operação do termossifão com água**



Fonte: Autoria própria (2022)

No Gráfico 10, 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, 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 termostato.

Gráfico 11: Resistência térmica do termostato com água



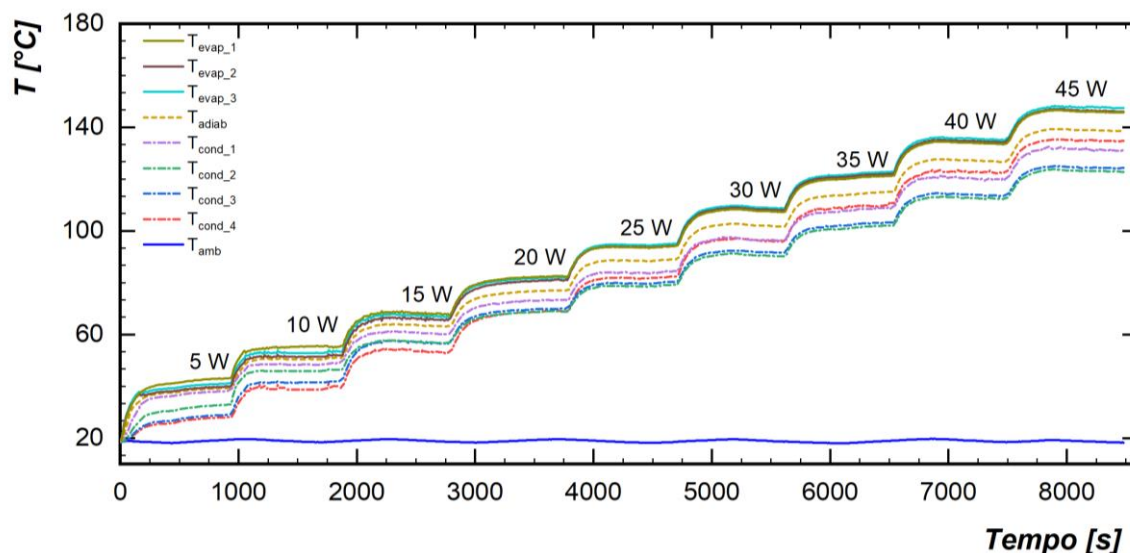
Fonte: Autoria própria (2022)

Pode ser notado através do Gráfico 11 que, para ambas as inclinações de operação, o dispositivo passivo contendo água destilada como fluido de trabalho apresentou valores de resistência térmica equivalentes, em toda a gama de cargas térmicas. A resistência térmica diminuiu com o aumento da carga térmica dissipada no evaporador. Portanto, é possível afirmar, juntamente aos dados de temperatura de operação, que o desempenho térmico do termostato com água destilada para as inclinações em estudo foi adequado.

#### 4.2.2 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 nos Gráficos 12 e 13, respectivamente, para a inclinação de 90° em relação a horizontal. Durante esses experimentos, o tempo de regime quase permanente foi de 700s para a primeira carga térmica aplicada.

**Gráfico 12: Distribuição da temperatura em função do tempo para o termossifão com GO 5,0% a 90°**

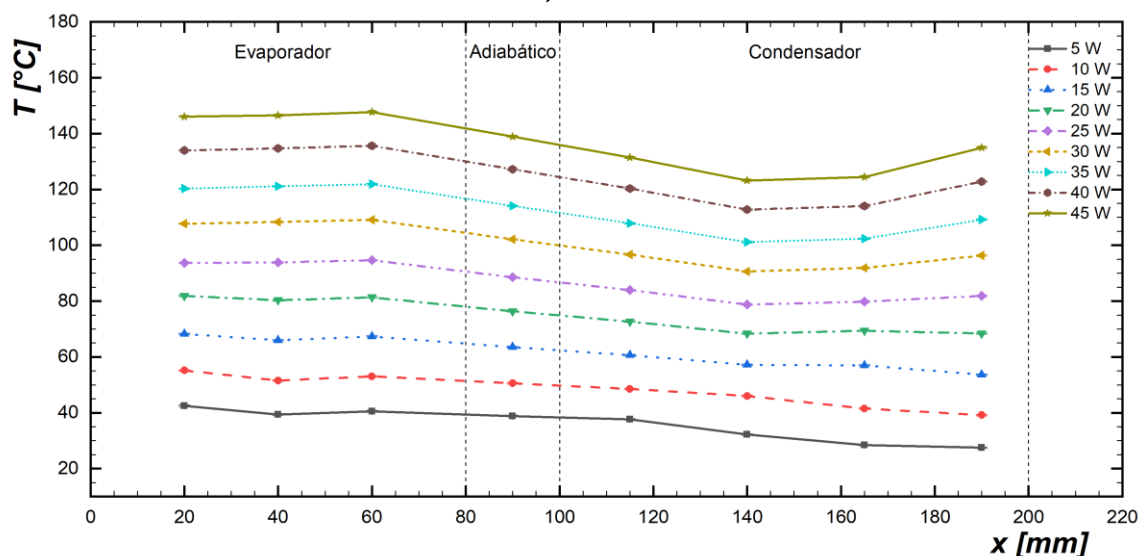


Fonte: Autoria própria (2022)

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.

**Gráfico 13: Distribuição da temperatura em função do comprimento para o termossifão com GO 5,0% a 90°**

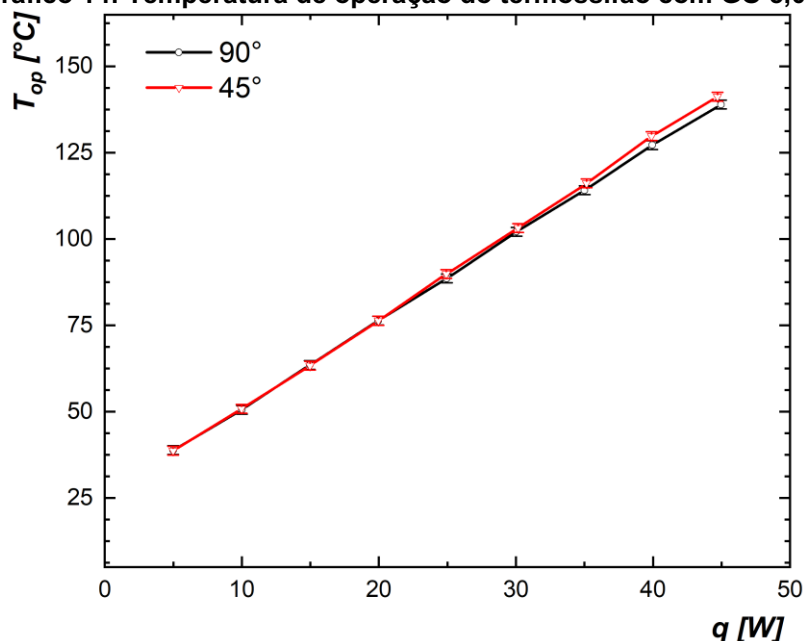


Fonte: Autoria própria (2022)

As distribuições de temperatura em função do tempo e do comprimento do termossifão, para os testes com nanofluido de concentração volumétrica igual a 5,0%, e inclinação de 45° em relação a horizontal, encontram-se no Apêndice C. Essas curvas apresentam comportamento similar aos apresentados nos Gráficos 12 e 13.

Nos Gráficos 14 e 15 são apresentados, respectivamente, as temperaturas de operação e as resistências térmicas em função das inclinações de trabalho considerando o termossifão contendo nanofluido de trabalho GO 5,0%.

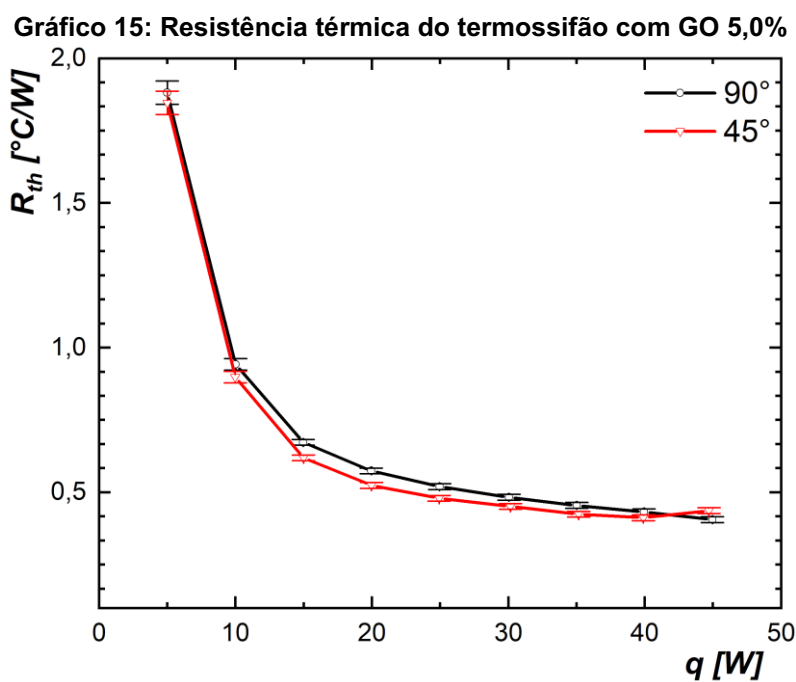
**Gráfico 14: Temperatura de operação do termossifão com GO 5,0%**



Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com o Gráfico 14, na faixa de aplicação de carga térmica entre 5W e 35W, os valores de temperatura de operação, são praticamente iguais para ambas as inclinações. 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.

A partir das curvas de resistência térmica (Gráfico 15), pode ser verificado que, para a inclinação 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.

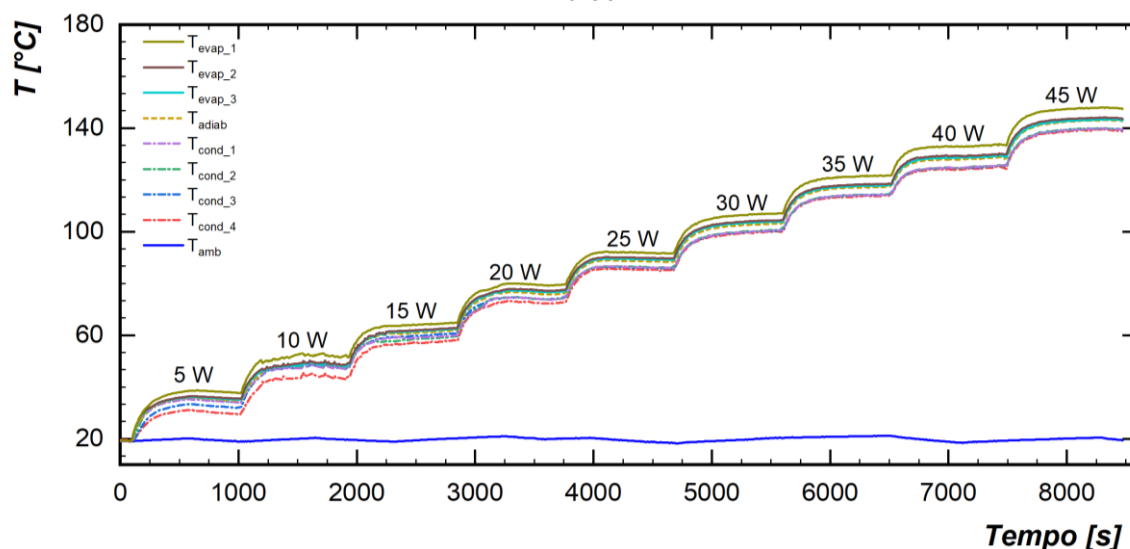


Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.2.3 Termossifão com Nanofluido de Óxido de Grafeno 2,5%

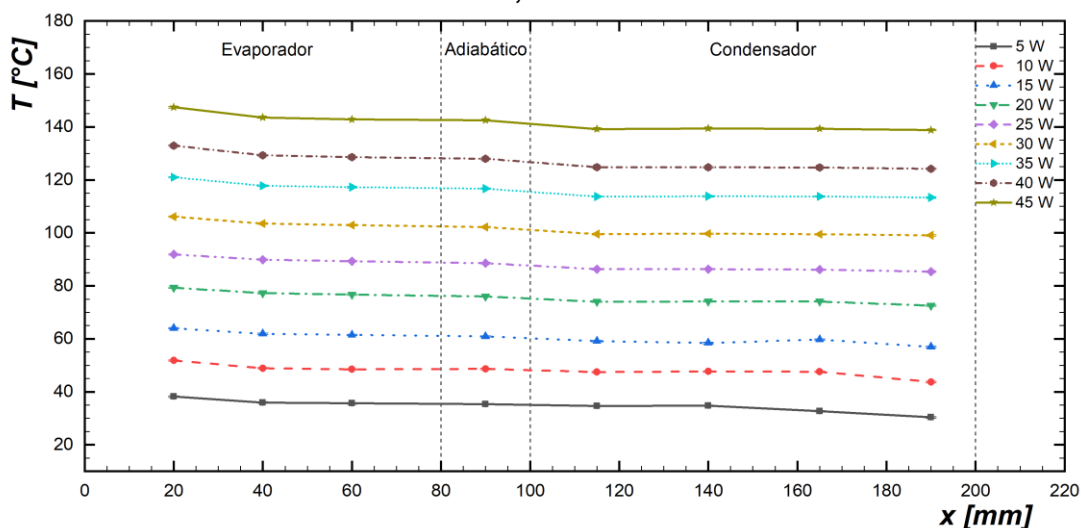
Após os testes experimentais do termossifão contendo nanofluido de óxido de grafeno de concentração volumétrica igual a 2,5% (GO 2,5%) como fluido de trabalho foram obtidas as distribuições de temperaturas em função do tempo e do comprimento, apresentadas nos Gráficos 16 e 17, respectivamente, para a inclinação de 90° em relação a horizontal. Para essa configuração, o tempo de regime quase permanente foi de 700s.

**Gráfico 16: Distribuição da temperatura em função do tempo para o termostifão com GO 2,5% a 90°**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 17: Distribuição da temperatura em função do comprimento para o termostifão com 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 termostifão 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.

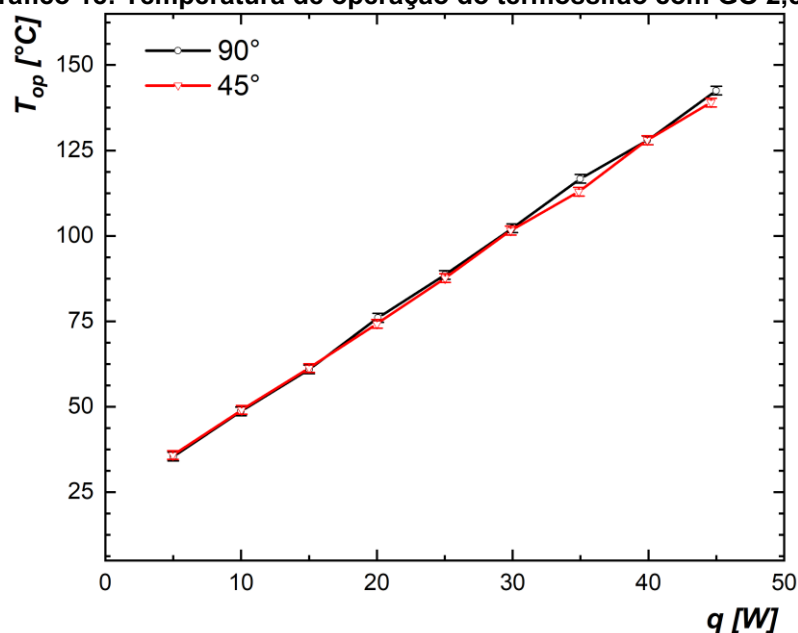
Pode ser notado através do Gráfico 17, que o evaporador e o condensador apresentaram uma condição de isotérmica em suas respectivas regiões.



As distribuições de temperatura em função do tempo e do comprimento do termossifão, para os testes experimentais com o dispositivo contendo nanofluido de óxido de grafeno de concentração volumétrica igual a 2,5% e inclinação de 45° em relação a horizontal, encontram-se no Apêndice D.

O Gráfico 18 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. O Gráfico 19 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%.

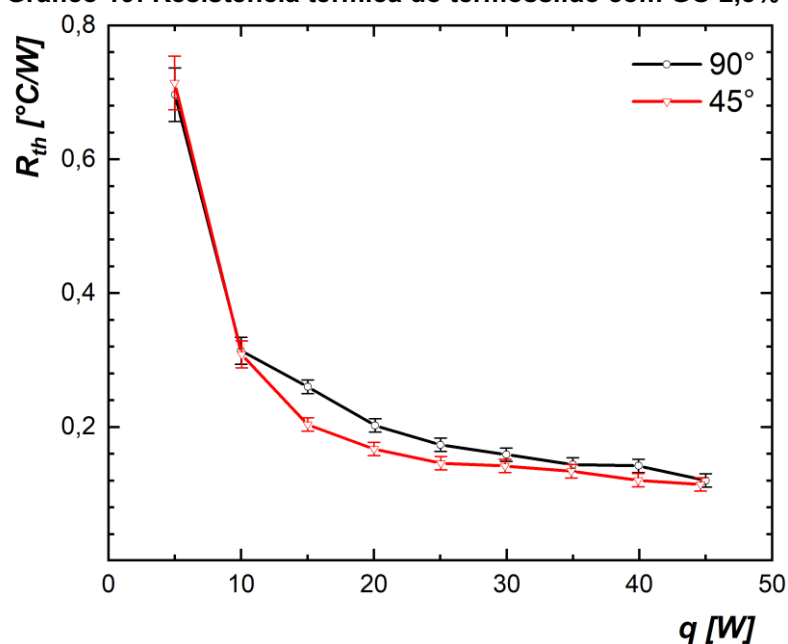
**Gráfico 18: Temperatura de operação do termossifão com GO 2,5%**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

De acordo com o Gráfico 18, 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, pois estão dentro da incerteza experimental. Após os 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.

Gráfico 19: Resistência térmica do termossifão com GO 2,5%



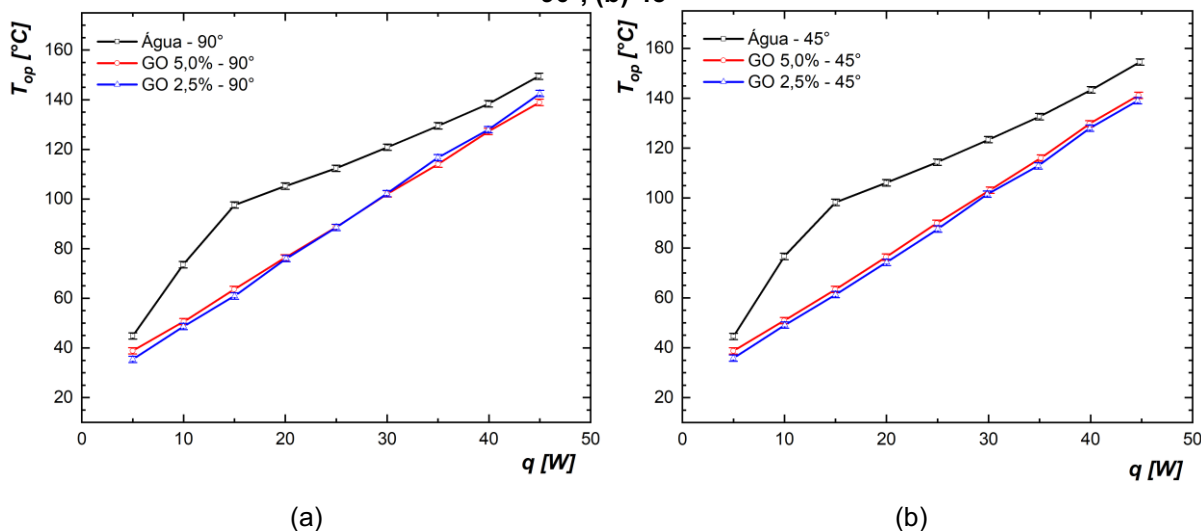
Fonte: Autoria própria (2022)

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.

#### 4.2.4 Comparação entre os Fluidos de Trabalho no Termossifão

No Gráfico 20 é apresentado um comparativo da temperatura de operação dos termossifões em função da carga térmica aplicada considerando os três diferentes fluidos de trabalho utilizados, água destilada, nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 5,0% (GO 5,0%) e nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5% (GO 2,5%), e as inclinações estudadas.

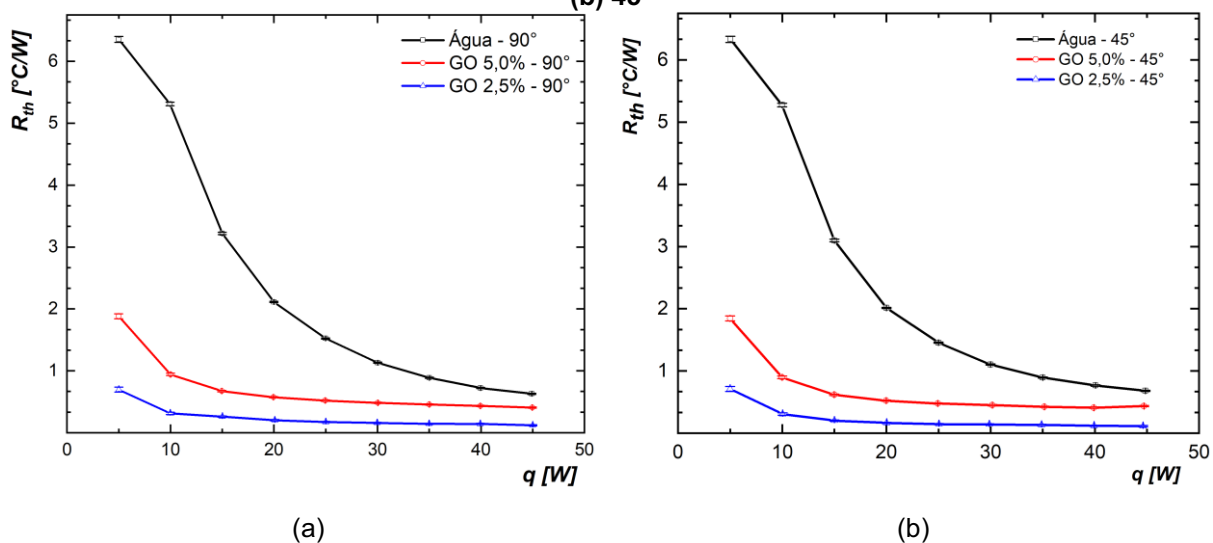
**Gráfico 20: Temperatura de operação do termossifão para os diferentes fluidos de trabalho (a) 90°, (b) 45°**



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 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.

O Gráfico 21 e a Tabela 3 apresentam o comparativo da resistência térmica dos termossifões em função da carga térmica aplicada considerando os três diferentes fluidos de trabalho utilizados, água destilada, nanofluido de óxido de grafeno 5,0% e nanofluido de óxido de grafeno 2,5% e considerando ambas as inclinações de operação analisadas.

**Gráfico 21: Resistência térmica do termossifão para os diferentes fluidos de trabalho (a) 90°, (b) 45°**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 3: Resistência térmica, em °C/W, do termossifão para diferentes potências, fluidos de trabalho e inclinações**

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

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 GO com concentração volumétrica de 2,5% apresentou um desempenho térmico melhor do que o termossifão com nanofluido GO com concentração volumétrica de 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° e de 83% para 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 a melhoria 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 no Gráfico 17, pela condição isotérmica no condensador e no evaporador do dispositivo.

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 GO 2,5% apresenta uma diminuição na resistência térmica; por consequência, têm melhoria no desempenho térmico, em comparação ao termossifão com concentração volumétrica de 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%.

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 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.

### **4.3 Tubo de calor**

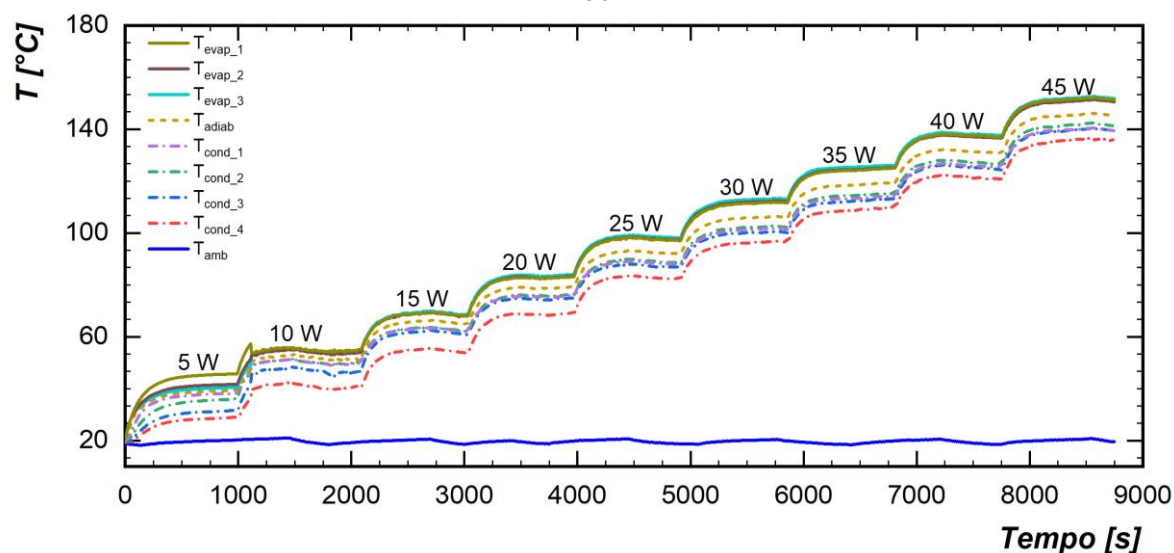
A seguir são apresentados e discutidos os resultados dos testes experimentais do tubo de calor contendo diferentes fluidos de trabalho: água destilada e nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5% (GO 2,5%), sob diferentes condições de carga térmica e inclinação de operação.

#### **4.3.1 Tubo de Calor com Água Destilada**

A distribuição de temperatura em relação ao tempo, para os testes experimentais do tubo de calor com água como fluido de trabalho é apresentada no Gráfico 22. É possível verificar os diferentes valores de temperatura assumidos pelas regiões, em razão da potência dissipada, onde, o evaporador apresenta os valores

mais elevados; a seção adiabática com valor intermediário; e o condensador com os menores valores. O dispositivo passivo alcançou o regime quase permanente em torno de 700s, após a aplicação da primeira carga térmica.

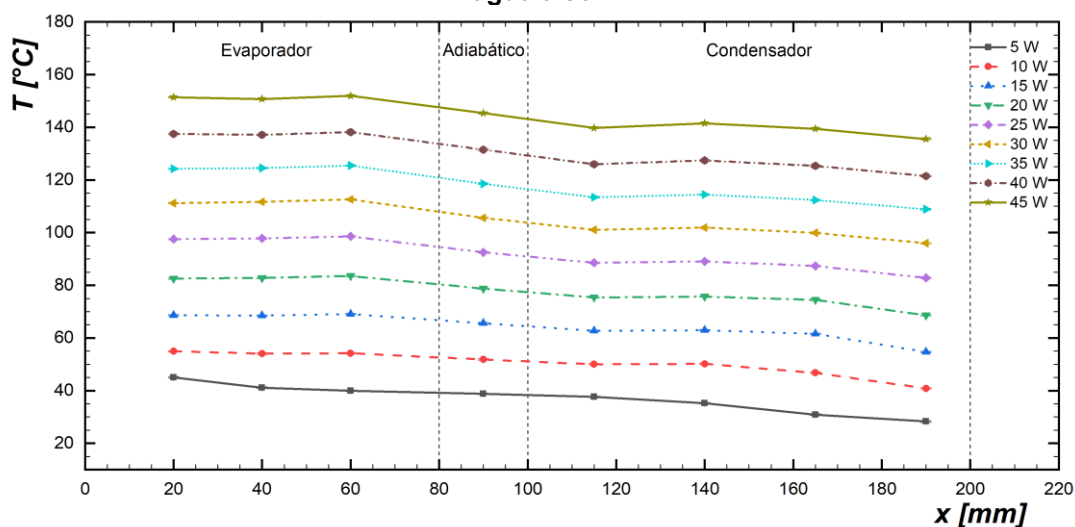
**Gráfico 22: Distribuição da temperatura em função do tempo para o tubo de calor com água a 90°**



Fonte: Autoria própria (2022)

No Gráfico 23 é mostrado o comportamento da distribuição de temperaturas ao longo do comprimento do tubo de calor com água destilada parametrizado na carga térmica aplicada. Pode ser observado um comportamento isotérmico nas regiões do evaporador e condensador.

**Gráfico 23: Distribuição da temperatura em função do comprimento para o tubo de calor com água a 90°**

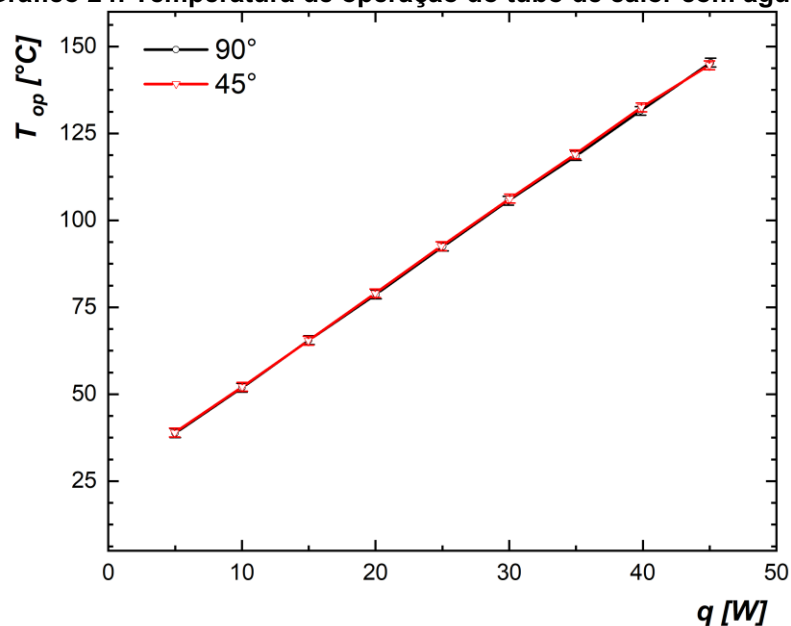


Fonte: Autoria própria (2022)

As curvas de distribuições de temperaturas em função do tempo e ao longo do comprimento do tubo de calor contendo água destilada como fluido de trabalho, para a inclinação de 45°, encontram-se no Apêndice E.

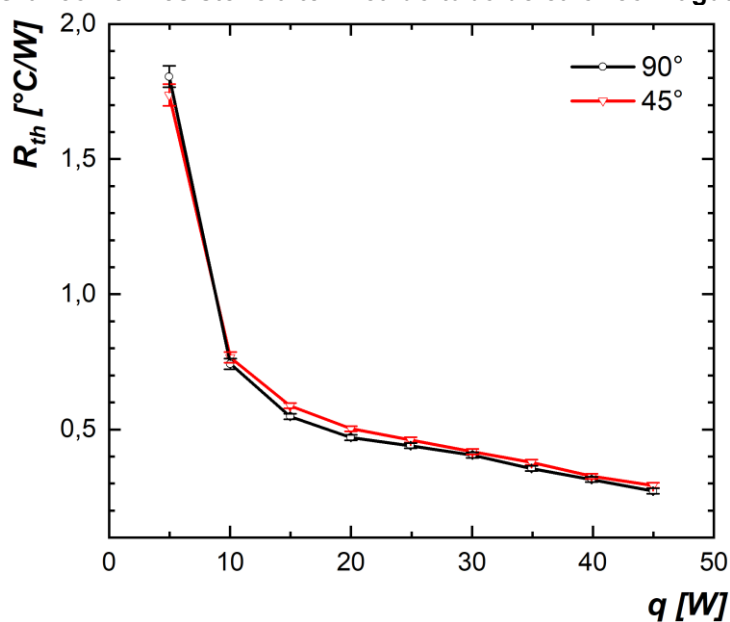
O comparativo experimental do desempenho térmico do tubo de calor com água, em função da inclinação de trabalho, é apresentado nos Gráficos 24 e 25, que correspondem, respectivamente, as curvas de temperatura de operação e a resistência térmica.

**Gráfico 24: Temperatura de operação do tubo de calor com água**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 25: Resistência térmica do tubo de calor com água**



Fonte: Autoria própria (2022)

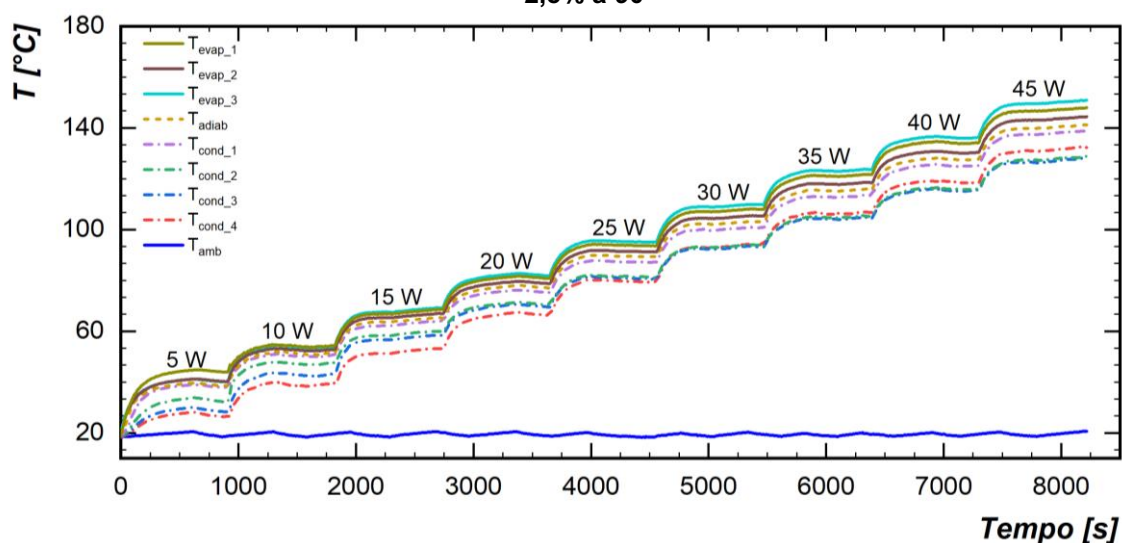
De acordo com o Gráfico 24, para todas as cargas térmicas analisadas, os valores de temperatura de operação são similares, para ambas as inclinações de trabalho, uma vez que estão dentro da incerteza experimental. O mesmo comportamento pode ser encontrado para a resistência térmica do tubo de calor com água, Gráfico 25, pois os valores encontram-se dentro do erro associado aos testes experimentais. Portanto, é possível afirmar que o desempenho térmico do tubo de calor com água foi satisfatório e independente da inclinação de trabalho estudada.

#### 4.3.2 Tubo de Calor com Nanofluido de Óxido de Grafeno 2,5%

Como os resultados experimentais obtidos para o estudo com termossifão apresentaram um melhor desempenho térmico para o nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5% como fluido de trabalho, para o tubo de calor com tela metálica *mesh* #13, foram executados os testes experimentais diretamente com essa concentração de nanofluido de trabalho.

Nos Gráficos 26 e 27 são apresentadas as distribuições de temperaturas em função do tempo e a resistência térmica ao longo do comprimento do tubo de calor, respectivamente, para a inclinação de operação de 90° em relação a horizontal (posição vertical).

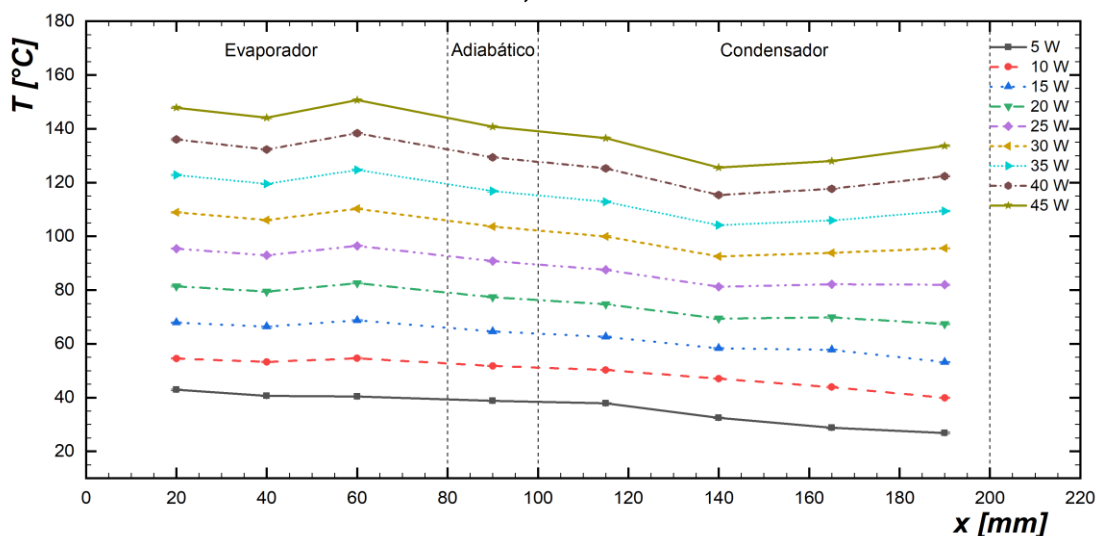
**Gráfico 26: Distribuição da temperatura em função do tempo para o tubo de calor com GO 2,5% a 90°**



Fonte: Autoria própria (2022)



**Gráfico 27: Distribuição da temperatura em função do comprimento para o tubo de calor com GO 2,5% a 90°**



Fonte: Autoria própria (2022)

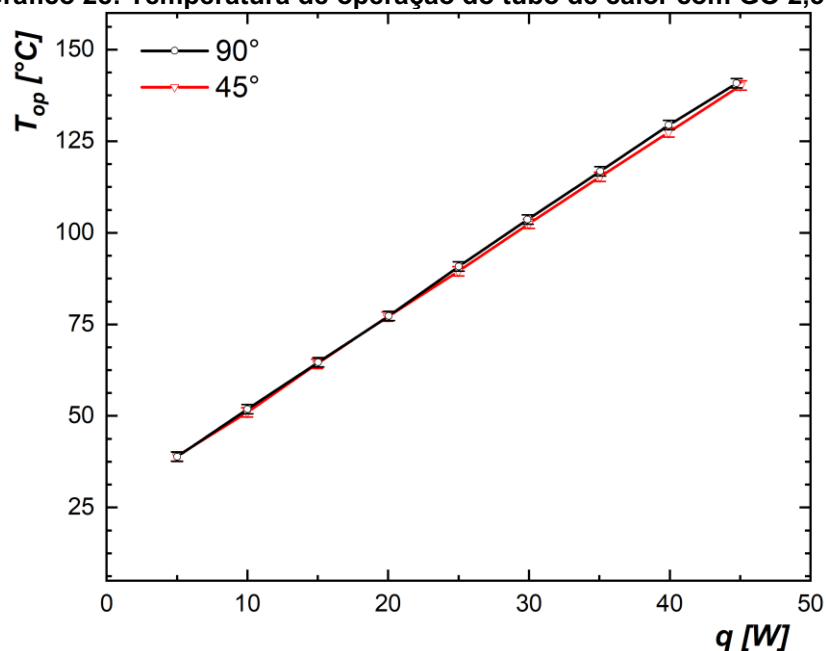
Pode ser observado que, para o nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5%, o comportamento do tubo de calor foi como esperado, onde o evaporador apresentou as maiores temperaturas, a seção adiabática com temperatura intermediária e o condensador apresentou as menores temperaturas considerando as cargas térmicas aplicadas.

As distribuições de temperatura em função do tempo e ao longo do comprimento do tubo de calor com tela metálica *mesh* #130, para os testes experimentais com nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5% e inclinação de 45° em relação a horizontal, encontram-se no Apêndice F.

O Gráfico 28 apresenta o comportamento da temperatura de operação (temperatura da seção adiabática) e o Gráfico 29 apresenta o comportamento da resistência térmica, ambos em função da carga térmica aplicada e parametrizados na inclinação de operação.

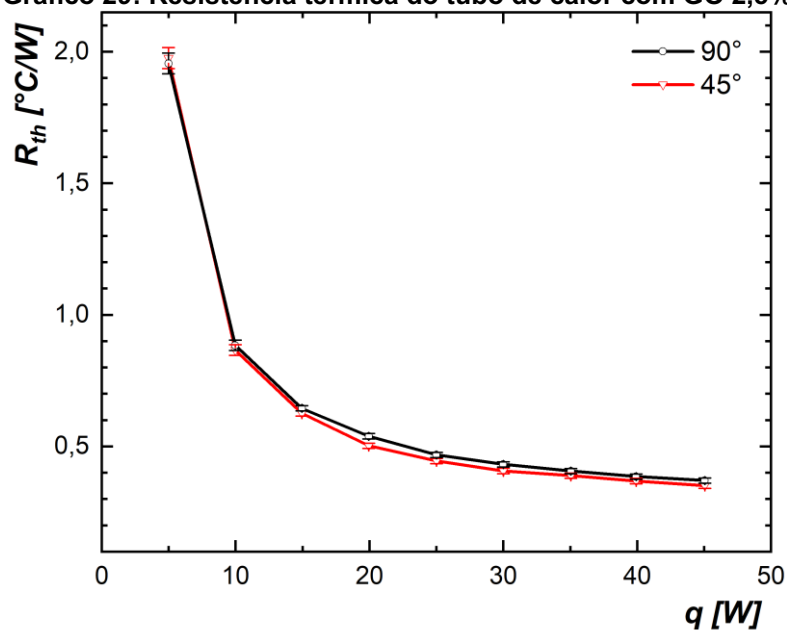
De acordo com o Gráfico 28, independentemente da inclinação de operação, pois estão dentro da incerteza experimental, os valores da temperatura de operação são iguais, aumentando com o aumento da potência dissipada. A mesma tendência pode ser observada no Gráfico 29 para a resistência térmica do termossifão com GO 2,5%. Os resultados experimentais encontrados para ambas as inclinações de operação apresentaram valores muito similares. A resistência térmica do dispositivo diminuiu com o aumento da potência dissipada em seu evaporador.

Gráfico 28: Temperatura de operação do tubo de calor com GO 2,5%



Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 29: Resistência térmica do tubo de calor com GO 2,5%



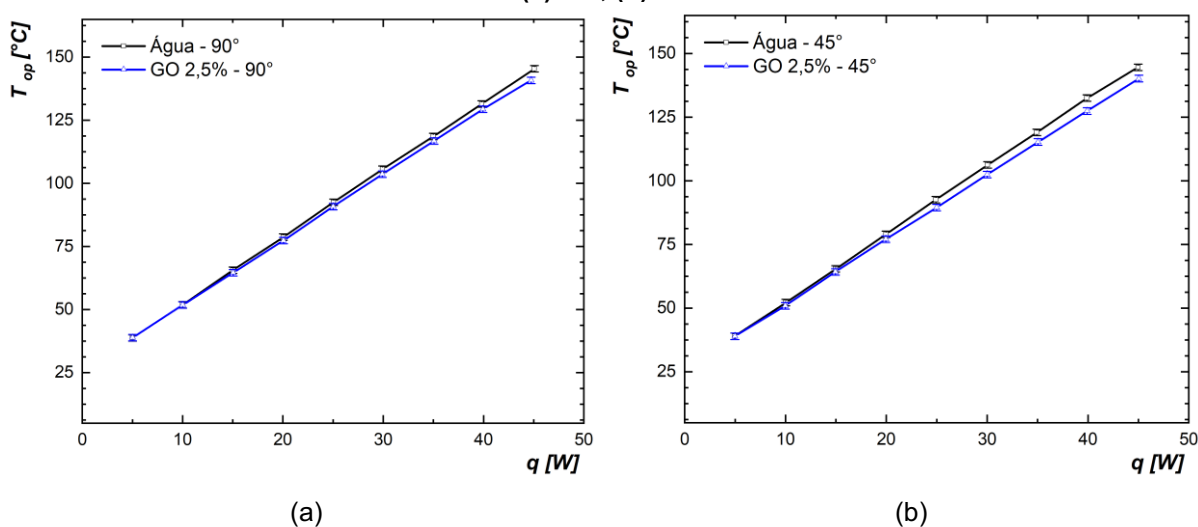
Fonte: Autoria própria (2022)

Dessa forma, é possível afirmar, juntamente aos dados de temperatura de operação, que o desempenho térmico do tubo de calor de tela metálica *mesh* #130 contendo nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5% (GO 2,5%) para as inclinações de operação em estudo foi adequado.

### 4.3.3 Comparação entre os Fluidos de Trabalho no Tubo de Calor

O Gráfico 30 mostra o comportamento da temperatura de operação do tubo de calor com tela metálica *mesh* #130, parametrizado nos diferentes fluidos de trabalho utilizados (água destilada e nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5%), em função da carga térmica aplicada.

**Gráfico 30: Temperatura de operação do tubo de calor para os diferentes fluidos de trabalho (a) 90°, (b) 45°**



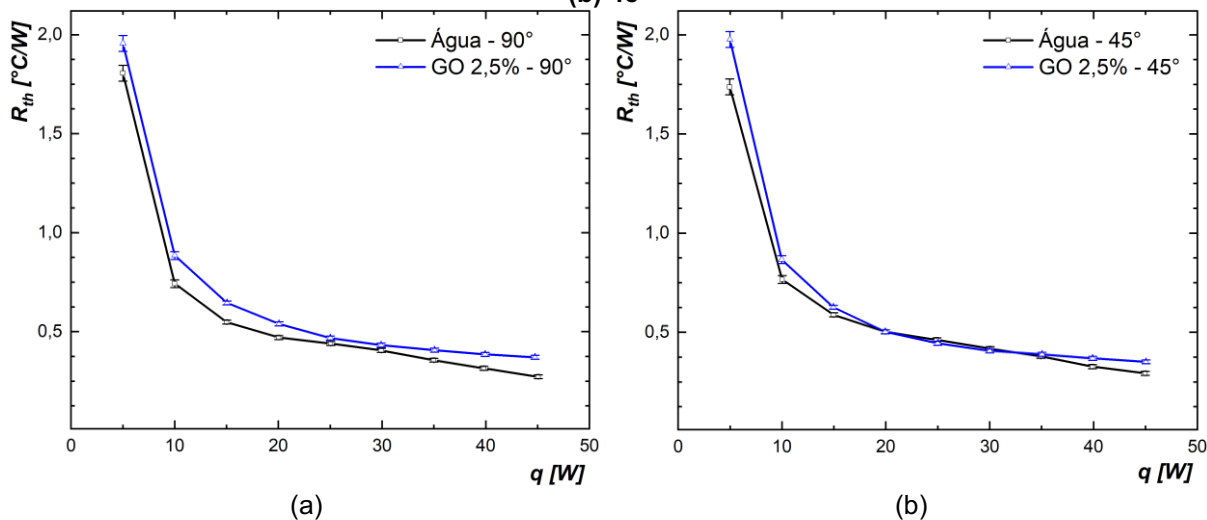
Fonte: Autoria própria (2022)

Para a inclinação de operação de 90°, posição vertical, nas potências dissipadas de 5W e 35W, a temperatura de operação considerando ambos os fluidos de trabalho foi igual, pois os resultados estão dentro da incerteza experimental. Na carga térmica 45W, o tubo de calor com nanofluido de óxido de grafeno apresentou uma diminuição da temperatura de operação em uma diferença relativa de 3%.

Em relação aos testes experimentais com inclinação de trabalho de 45°, para as potências dissipadas entre 5W e 25W, as temperaturas de operação dos fluidos de trabalho foram iguais, em razão da incerteza experimental dos termopares. Entretanto, a partir da carga térmica de 30W, o tubo de calor contendo nanofluido de óxido de grafeno GO 2,5% apresentou uma diminuição da temperatura de operação, em relação ao tubo de calor com água destilada. O valor máximo de diferença relativa foi de 4% para a carga térmica de 40W.

O Gráfico 31 e a Tabela 4 apresentam o comparativo da resistência térmica do tubo de calor de tela metálica *mesh* #130 contendo os fluidos de trabalho em questão em função da carga térmica, considerando as inclinações analisadas.

**Gráfico 31: Resistência térmica do tubo de calor para os diferentes fluidos de trabalho (a) 90°, (b) 45°**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 4: Resistência térmica, em °C/W, do tubo de calor para diferentes potências, fluidos de trabalho e inclinações**

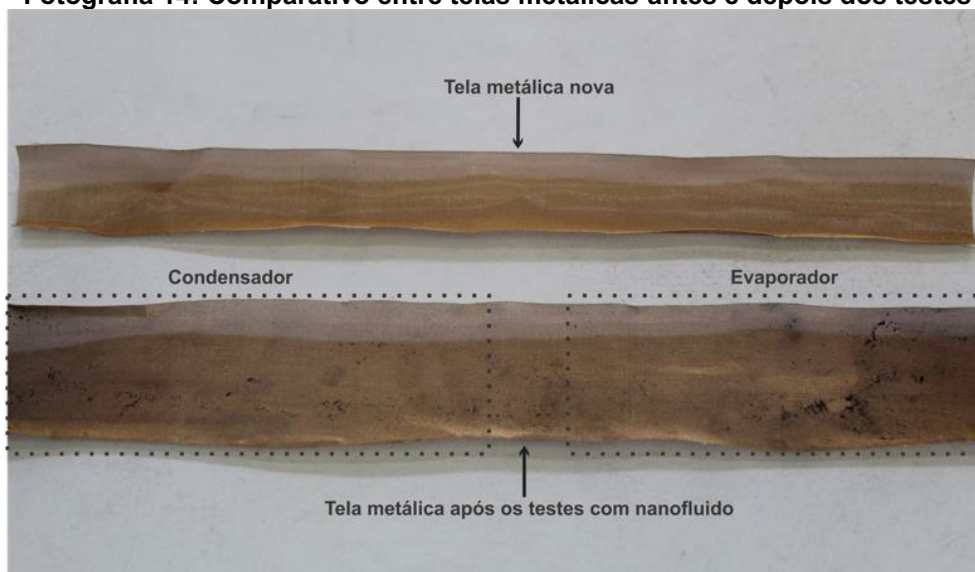
Carga Térmica [W]	Inclinação de 90°		Inclinação de 45°	
	Água	GO 2,5%	Água	GO 2,5%
5	1,81 ± 0,04	1,96 ± 0,04	1,74 ± 0,04	1,98 ± 0,04
10	0,74 ± 0,02	0,88 ± 0,02	0,77 ± 0,02	0,87 ± 0,02
15	0,55 ± 0,01	0,65 ± 0,01	0,59 ± 0,01	0,63 ± 0,01
20	0,47 ± 0,01	0,54 ± 0,01	0,50 ± 0,01	0,50 ± 0,01
25	0,44 ± 0,01	0,47 ± 0,01	0,46 ± 0,01	0,44 ± 0,01
30	0,41 ± 0,01	0,43 ± 0,01	0,42 ± 0,01	0,41 ± 0,01
35	0,36 ± 0,01	0,41 ± 0,01	0,38 ± 0,01	0,39 ± 0,01
40	0,32 ± 0,01	0,39 ± 0,01	0,33 ± 0,01	0,37 ± 0,01
45	0,27 ± 0,01	0,37 ± 0,01	0,29 ± 0,01	0,35 ± 0,01

Fonte: Autoria própria (2022)

Os resultados demonstram um aumento da resistência térmica, em toda a faixa de aplicação de carga térmica para ambas as inclinações, a partir da utilização do nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5% como fluido de trabalho do tubo de calor. O nanofluido GO 2,5% apresentou, em comparação com a água como fluido de trabalho, um acréscimo máximo na resistência térmica, para ambas as inclinações de operação, na potência dissipada de 45W, com valores iguais a 36% para a posição vertical e 20% para a posição inclinada em 45°.

Essa piora no desempenho térmico do tubo de calor, através da utilização do nanofluido de óxido de grafeno, pode estar relacionada a incrustações de nanopartículas aglomeradas na tela metálica, de forma que, o retorno do líquido ao evaporador por bombeamento capilar, foi prejudicado. A Fotografia 14 demonstra um comparativo entre uma tela metálica nova e a tela metálica retirada do tubo de calor após os testes experimentais com o nanofluido de óxido de grafeno.

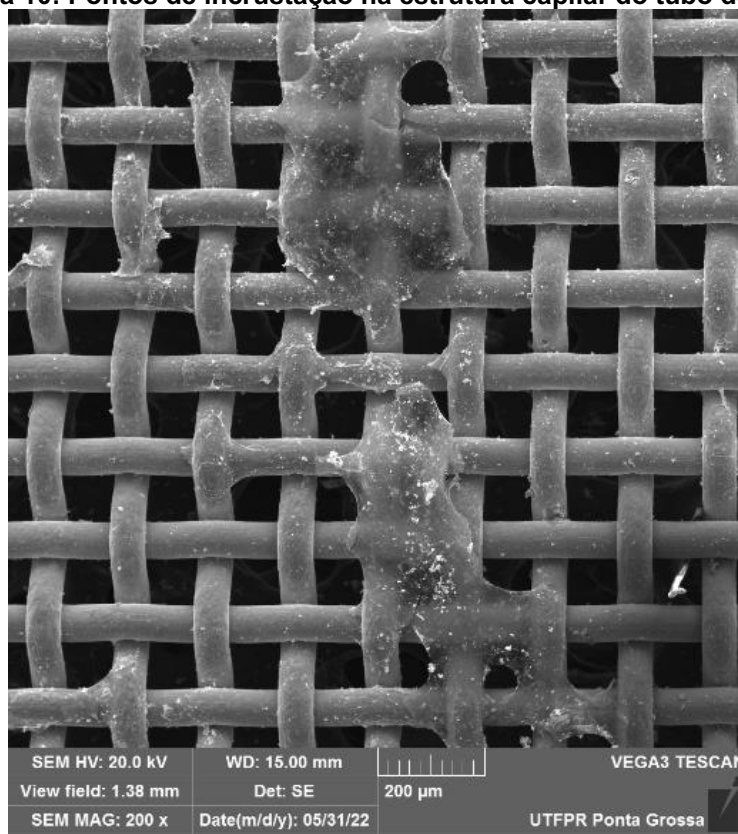
**Fotografia 14: Comparativo entre telas metálicas antes e depois dos testes**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Pode ser notado na Fotografia 14 pontos de coloração escura na malha metálica *mesh* #130 retirada do tubo de calor após a execução dos testes experimentais, os quais indicam incrustações. De forma complementar, foi realizada a captura de imagem desses pontos em um MEV, conforme mostrado na Figura 10.

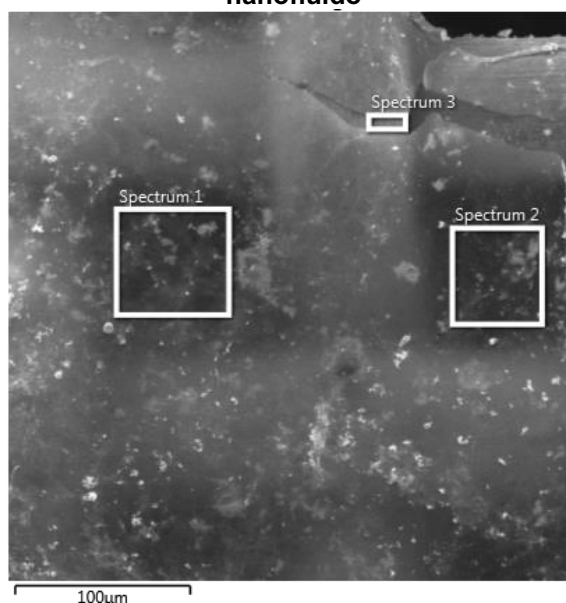
**Figura 10: Pontos de incrustação na estrutura capilar do tubo de calor**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Para confirmar os elementos químicos presentes nos pontos de incrustação da tela metálica de bronze fosforo *mesh* #130 do tubo de calor foi executada uma Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) nos locais indicados na Figura 11, onde foi utilizada a configuração com aumento de 1000 vezes.

**Figura 11: Pontos de análise EDS na estrutura capilar após testes experimentais com nanofluido**



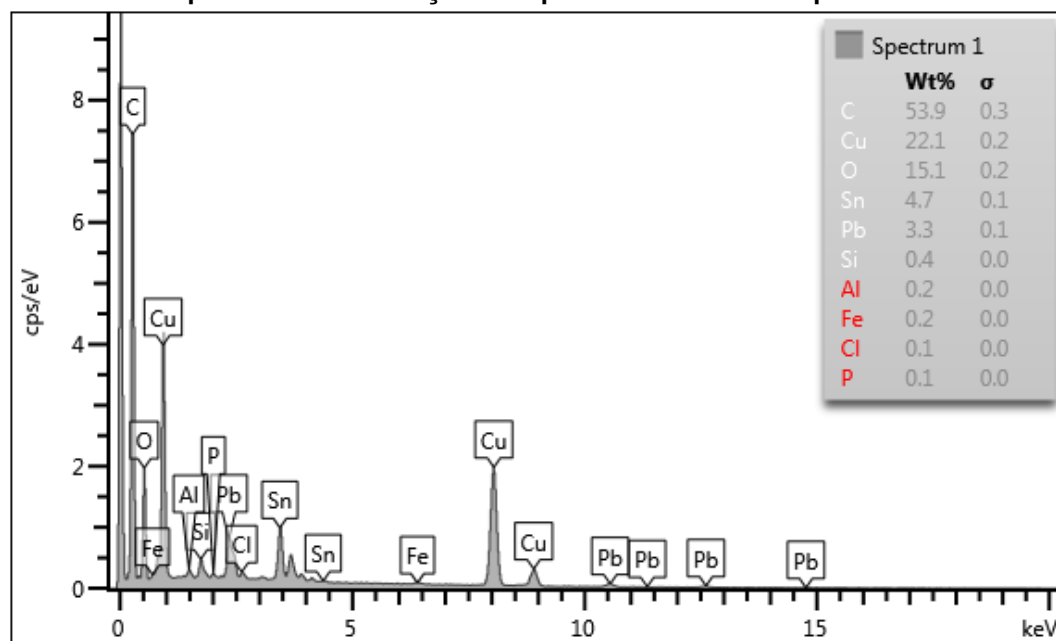
**Fonte: Autoria própria (2022)**

Os Pontos 1 e 2 referem-se aos locais com incrustações em aberturas da tela metálica e o Ponto 3 foi utilizado como referência da malha de bronze fosforo *mesh* #130 sem incrustação. Os espectros, assim como as respectivas concentrações em peso dos elementos químicos, obtidos para cada um dos pontos em questão, estão apresentados nos Gráficos 32, 33 e 34.

O Ponto 3 expõem concentrações de elementos químicos coerentes com os constituintes da tela metálica *mesh* #130, previamente aos testes experimentais, presentes no Apêndice A. Enquanto que, para os Pontos 1 e 2, foi verificada uma similaridade entre os resultados obtidos, onde a porcentagem de Carbono (C) exibiu valores em torno de 58%, indicativo de que as incrustações são formadas por aglomerações de nanopartículas de óxido de grafeno.

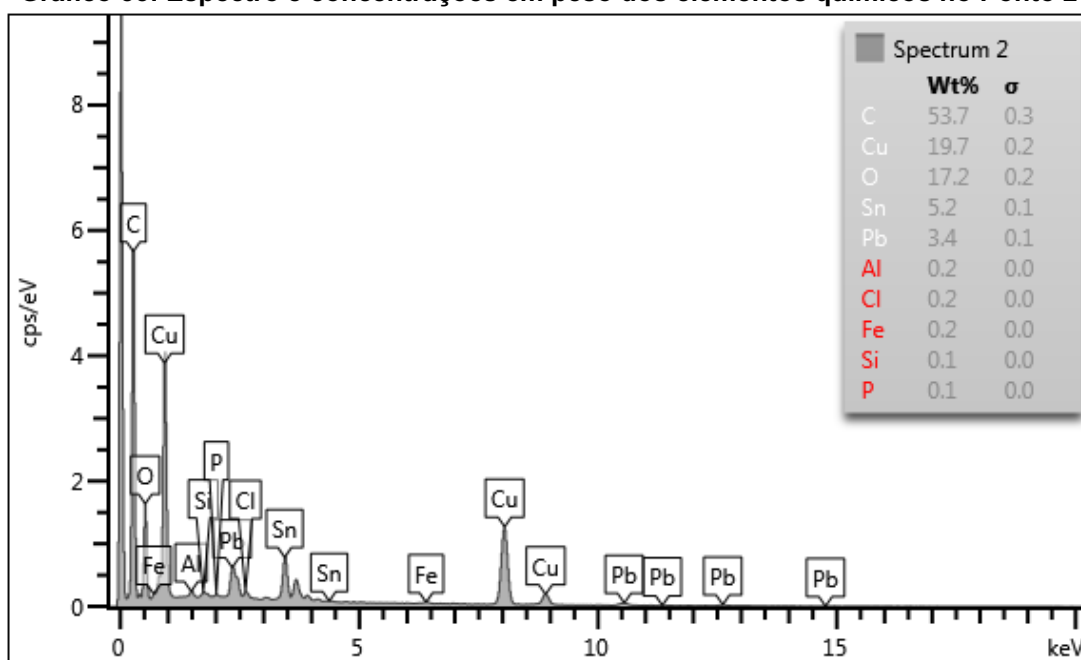
Diante do exposto, devido à aglomeração de nanopartículas de óxido de grafeno na tela metálica, pode ser afirmado que, o tubo de calor com nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5% não apresentou um comportamento satisfatório.

Gráfico 32: Espectro e concentrações em peso dos elementos químicos no Ponto 1



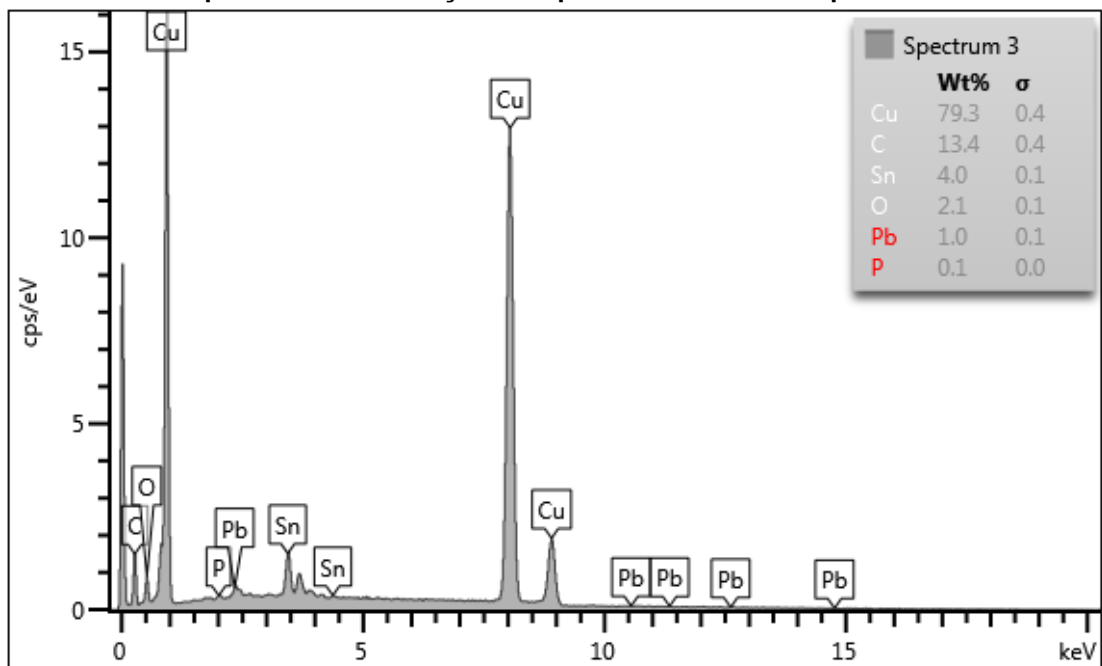
Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 33: Espectro e concentrações em peso dos elementos químicos no Ponto 2



Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 34: Espectro e concentrações em peso dos elementos químicos no Ponto 3



Fonte: Autoria própria (2022)



## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesse Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica foi executada uma investigação experimental da utilização de nanofluido de óxido de grafeno, com diferentes concentrações volumétricas, 5,0% e 2,5%, em comparação a água destilada, como fluido de trabalho de um termossifão e de um tubo de calor com estrutura capilar de tela metálica *mesh* #130.

Para os testes experimentais dos dispositivos passivos de transferência de calor, além dos diferentes fluidos de trabalho, foram efetuadas a variação da inclinação de operação em relação a horizontal, 45° e 90° (vertical), e da carga térmica aplicada no evaporador, de 5W até 45W. De forma geral, o termossifão e o tubo de calor operaram de forma adequada nas condições de trabalho analisadas independentemente da sua posição de trabalho.

Considerando os resultados do termossifão, foram observadas diminuições consideráveis na temperatura de operação e na resistência térmica do dispositivo, 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% e para o nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 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 melhores resultados entre os fluidos de trabalho analisados.

Com base no desempenho térmico superior do nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5%, e, buscando minimizar problemas de sedimentação e aglomeração de nanopartículas, para os testes experimentais do tubo

de calor com tela metálica *mesh* #130, foi utilizado diretamente o nanofluido GO 2,5% em comparação à água destilada. Os resultados experimentais demonstram uma piora no desempenho térmico do tubo de calor com nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5%, onde a resistência térmica apresentou um aumento de até 36%, em relação à utilização de água. Esse prejuízo ao desempenho do dispositivo está relacionado a incrustações de aglomerados de nanopartículas de óxido de grafeno na tela metálica, de forma que o retorno do líquido, por meio da estrutura capilar, para o evaporador, é dificultado, prejudicando substancialmente o bombeamento capilar e, conseqüentemente, o funcionamento do tubo de calor.

Nesse contexto, como sugestão para trabalhos futuros, para dispositivos passivos de transferência de calor com estrutura capilar, como os de tela metálica, a utilização de concentrações menores de nanopartículas deve ser considerada, conforme presente em Kim e Bang (2016), onde a concentração ótima de nanofluido de óxido de grafeno foi de 0,01% em volume.

Além disso, propõem-se como próximos trabalhos:

- analisar experimentalmente o desempenho térmico do termossifão com nanofluido de óxido de grafeno, para concentrações volumétricas de 1,0%; 0,50% e 0,25%;
- avaliar o comportamento térmico de tubo de calor e a possibilidade de incrustações na estrutura capilar, para concentrações volumétricas entre 0,01% e 0,10% de nanopartículas de óxido de grafeno;
- utilizar outros nanofluidos (óxidos de nióbio, de ouro ou de prata) como fluidos de trabalho, em ambos os dispositivos passivos de transferência de calor.

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, Vinícius Marrone de. **Influência da razão de preenchimento e da inclinação no desempenho térmico de termossifões**. 2016. 118 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

ANAND, R. S. *et al.* Experimental studies on thermosyphon using low global warming potential refrigerant HFE7000 and nanorefrigerant HFE7000/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering**, v. 235, n. 3, p. 707–717, jan. 2020.

ANIN VINCELY, D.; NATARAJAN, E. Experimental investigation of the solar FPC performance using graphene oxide nanofluid under forced circulation. **Energy Conversion and Management**, v. 117, p. 1–11, jun. 2016

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, 2018.

AZIZI, M. *et al.* Experimental Analysis of Thermal Performance in a Two-Phase Closed Thermosiphon Using Graphene/Water Nanofluid. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 52, n. 29, p. 10015 – 10021, jun. 2013.

BAHIRAEI, M.; HESHMATIAN, S. Graphene family nanofluids: A critical review and future research directions. **Energy Conversion and Management**, v. 196, p. 1222–1256, set. 2019.

DANIELEWICZ, J. *et al.* Experimental and analytical performance investigation of air to air two phase closed thermosyphon based heat exchangers. **Energy**, v. 77, p. 82–87, dez. 2014.

DAS, S. *et al.* Role of graphene nanofluids on heat transfer enhancement in thermosyphon. **Journal of Science: Advanced Materials and Devices**, v. 4, n. 1, p. 163–169, mar. 2019.

DEDAVID, B. A. *et al.* **Microscopia Eletrônica de Varredura: aplicações e preparação de amostras : materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DIAS, S. P. et al. **Química Analítica: Teoria e Prática Essenciais**. Porto Alegre: Bookman, 2016.

DIMBARRE, Victor Vaurek. **Investigação experimental do comportamento térmico de termossifões aplicados a coletores solares utilizando nanofluido de óxido de grafeno**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

ELTAWEEL, M.; ABDEL-REHIM, A. A. Energy and exergy analysis for stationary solar collectors using nanofluids: A review. **International Journal of Energy Research**, v. 45, n. 3, p. 3643–3670, nov. 2020.

GUICHET, V.; ALMAHMOUD, S.; JOUHARA, H. Nucleate pool boiling heat transfer in wickless heat pipes (two-phase closed thermosyphons): A critical review of correlations. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 13, article 100384, out. 2019.

GHORABAE, H. *et al.* The use of nanofluids in thermosyphon heat pipe: A comprehensive review. **Powder Technology**, v. 394, p. 250–269, dez. 2021.

HERRERA, B.; GALLEGO, A.; CACUA, K. Experimental evaluation of a thermosyphon-based heat exchanger working with a graphene oxide (GO) nanofluid in a cogeneration system. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 24, article 100949, ago. 2021.

HOLMAN, J. P. **Experimental methods for engineers**, McGrall-Hill, New York. 2011.

HUMMERS, W. S.; OFFEMAN, R. E. Preparation of graphitic oxide. **Journal of the American Chemical Society**, v. 80, n. 6, p. 1339, mar. 1958.

JOUHARA, H. *et al.* Heat pipe based systems - Advances and applications. **Energy**, v. 128, p. 729–754, jun. 2017.

KEKLIKCIOGLU CAKMAK, N. The impact of surfactants on the stability and thermal conductivity of graphene oxide de-ionized water nanofluids. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 139, n. 3, p. 1895–1902, dez. 2019.

KIM, K. M.; BANG, I. C. Effects of graphene oxide nanofluids on heat pipe performance and capillary limits. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 100, p. 346–356, fev. 2016.

KLEMEŠ, J. J. et al. Heat transfer enhancement, intensification and optimisation in heat exchanger network retrofit and operation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 120, article 109644, mar. 2020.

KLINE, S.J., and MCCLINTOCK, F.A. Analysis of uncertainty in single-sample experiments. **Mechanical Engineering**, v. 75, p. 3–8, 1953.

KRAMBECK, L. *et al.* Thermal performance evaluation of different passive devices for electronics cooling. **Thermal Science**, v.23, n. 2 Part B, p. 1151 – 1160, 2019.

KRAMBECK, Larissa. **Investigação Experimental do Desempenho Térmico de Telas Metálicas em Tubos de Calor**. 2016. 90. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

MACHADO, Pedro Leineker Ochoski. **Sistema híbrido fotovoltaico/térmico para geração de energia elétrica e aquecimento de água utilizando termossifões**. 2022. 171. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federa do Paraná. Ponta Grossa. 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, dez. 2020.

MANTELLI, M. B. H. **Thermosyphons and Heat Pipes: Theory and Applications**. Cham: Springer International Publishing, 2021.

MROUE, H. *et al.* Experimental and numerical investigation of an air-to-water heat pipe-based heat exchanger. **Applied Thermal Engineering**, v. 78, p. 339–350, mar. 2015.

NARUKA, D. S.; DWIVEDI, R.; SINGH, P. K. Experimental inquisition of heat pipe: performance evaluation for different fluids. **Experimental Heat Transfer**, v. 33, p. 668 – 682, jan. 2020.

NAZARI, M. A. *et al.* Experimental investigation of graphene oxide nanofluid on heat transfer enhancement of pulsating heat pipe. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 91, p. 90–94, fev. 2018.

NAZARI, M. A. et al. A review on application of nanofluid in various types of heat pipes. **Journal of Central South University**, v. 26, n. 5, p. 1021–1041, maio 2019.

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, ago. 2021.

NOVOSELOV, K. S. *et al.* Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. **Science**, 2004, v. 306, p. 666-669.

RAMEZANIZADEH, M. *et al.* Application of nanofluids in thermosyphons: A review. **Journal of Molecular Liquids**, v. 272, p. 395–402, dez. 2018.

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, nov. 2016.

RITCHIE, H.; ROSER, M. Energy Production and Consumption. **Our Worlds in Data**. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>>. Acesso em: 3 mar. 2022.

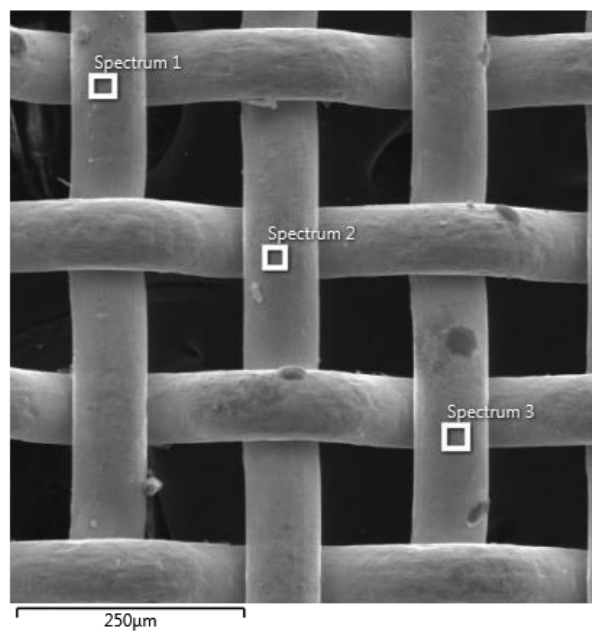
ROSA, G.; GAUTO, M.; GONÇALVES, F. **Química Analítica: Práticas de Laboratório**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

SKOOG, A. D. *et al.* **Fundamentos de Química Analítica**. 8 ed. São Paulo: Thomson, 2006.

VASILIEV, L. L. Heat Pipes, Nanofluids, and Nanotechnologies. **Journal of Engineering Physics and Thermophysics**, v. 94, n. 5, p. 1217–1226, set. 2021.

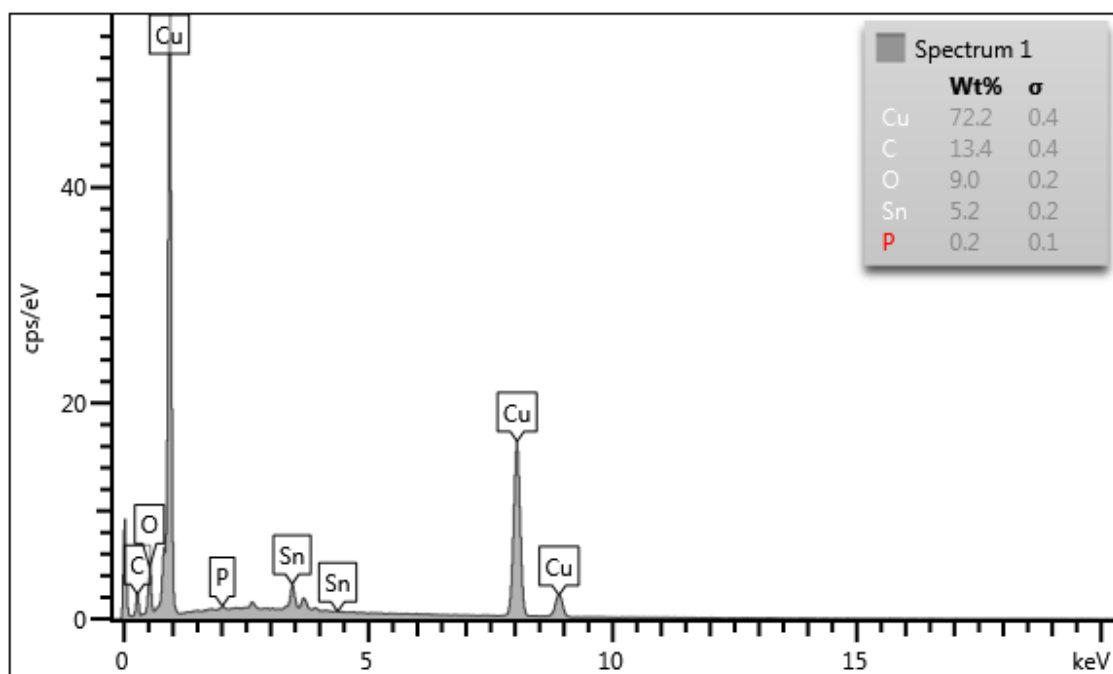
## APÊNDICE A

Figura A1: Pontos de análise EDS na estrutura capilar antes dos testes experimentais



Fonte: Autoria própria (2022)

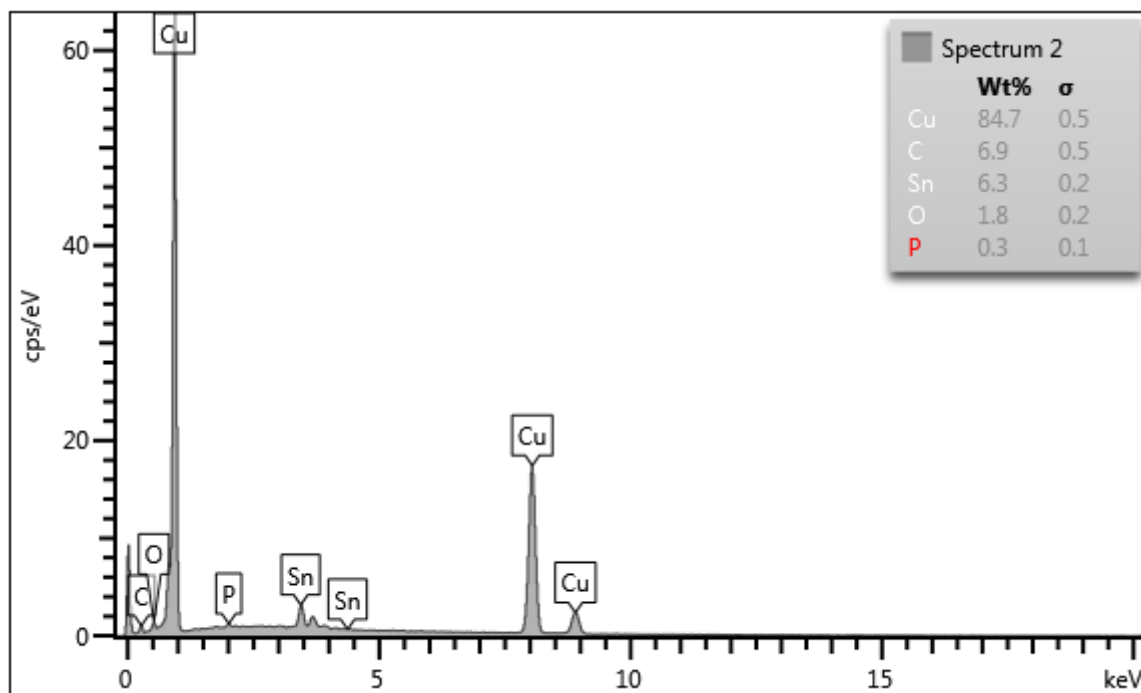
Gráfico A1: Espectro e concentrações em peso dos elementos químicos no ponto 1



Fonte: Autoria própria (2022)

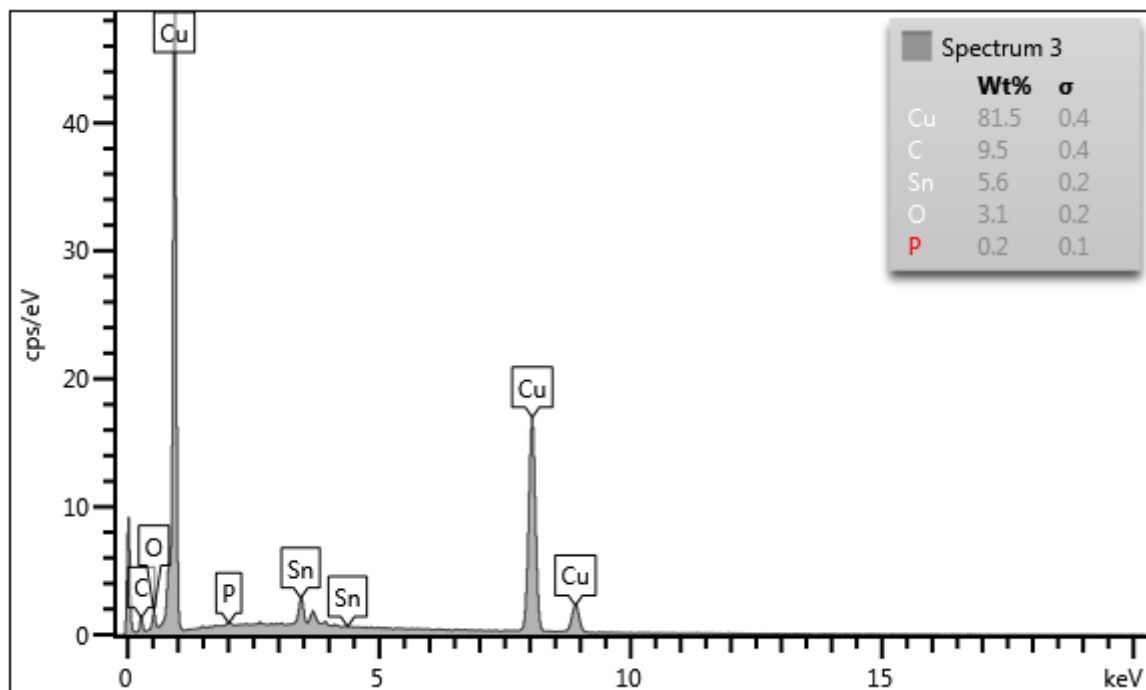


Gráfico A2: Espectro e concentrações em peso dos elementos químicos no ponto 2



Fonte: Autoria própria (2022)

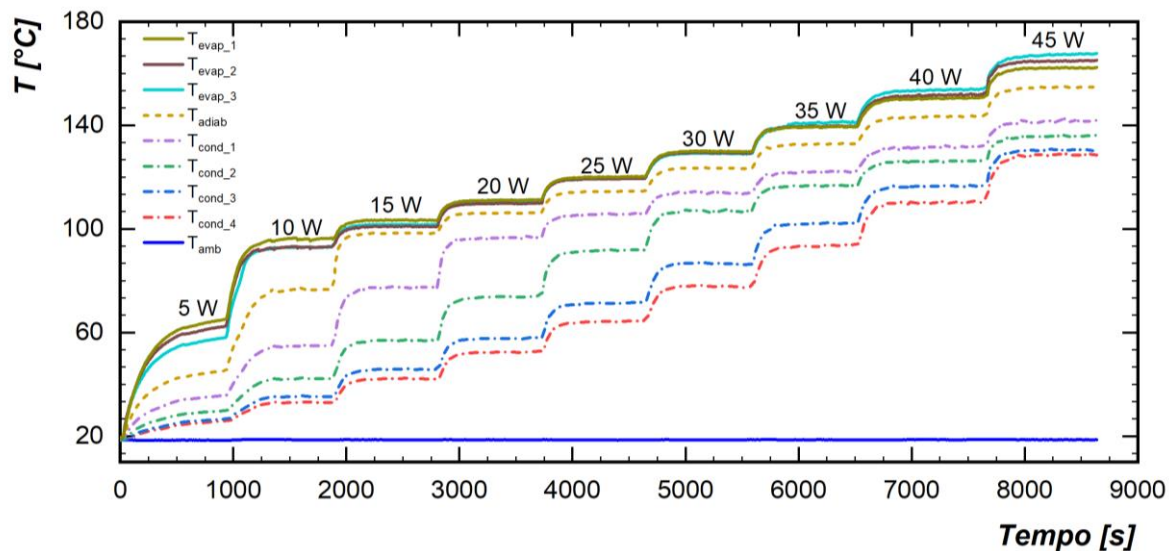
Gráfico A3: Espectro e concentrações em peso dos elementos químicos no ponto 3



Fonte: Autoria própria (2022)

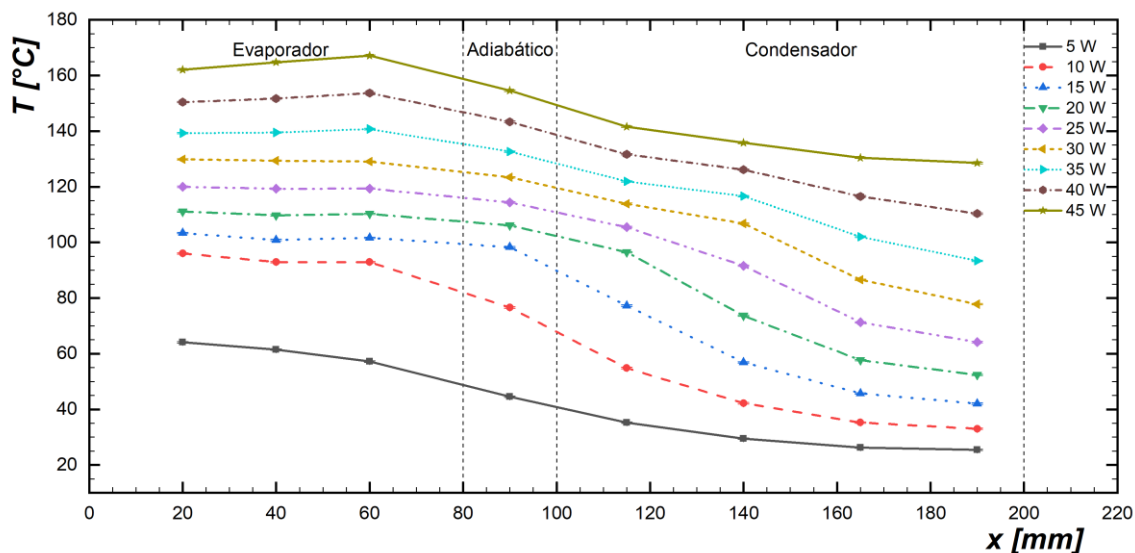
**APÊNDICE B**

Gráfico B 1: Distribuição da temperatura em função do tempo para o termostifão com água a 45°



Fonte: Autoria própria (2022)

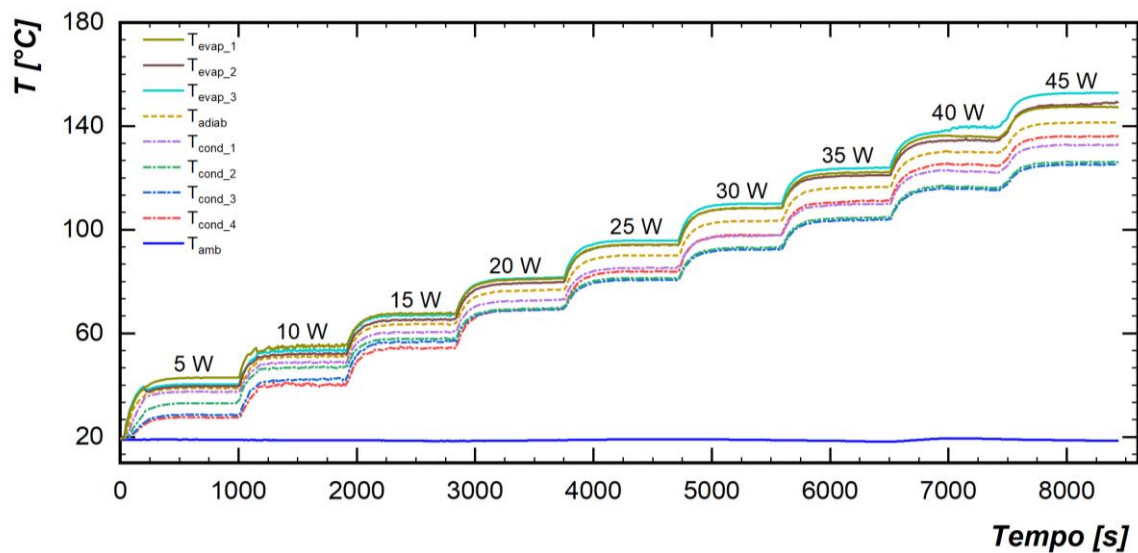
Gráfico B 2: Distribuição da temperatura em função do comprimento para o termostifão com água a 45°



Fonte: Autoria própria (2022)

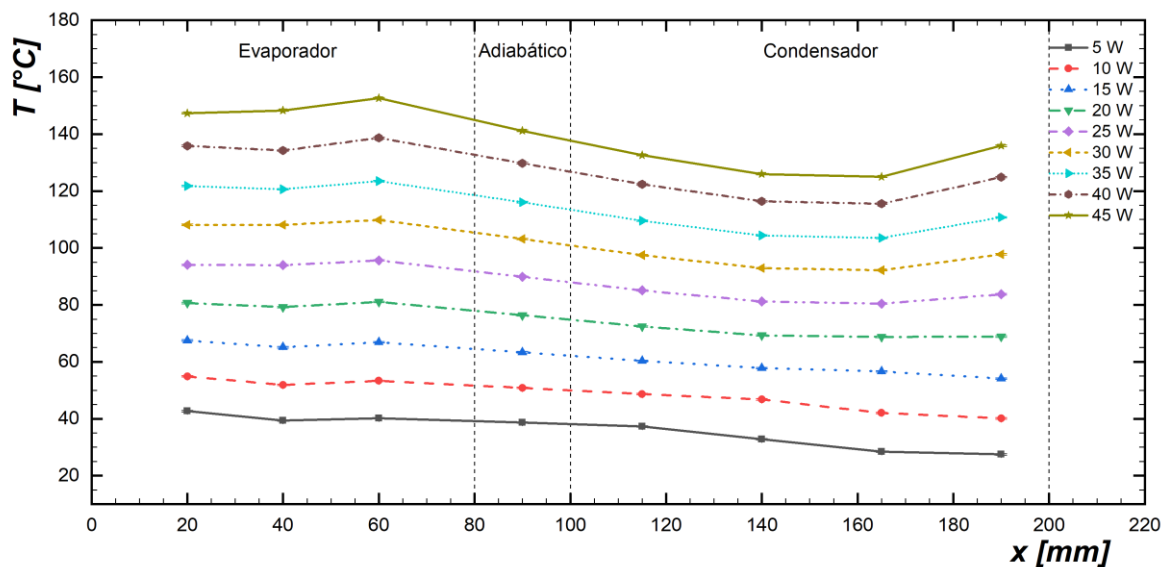
**APÊNDICE C**

Gráfico C 1: Distribuição da temperatura em função do tempo para o termossifão com GO 5,0% a 45°



Fonte: Autoria própria (2022)

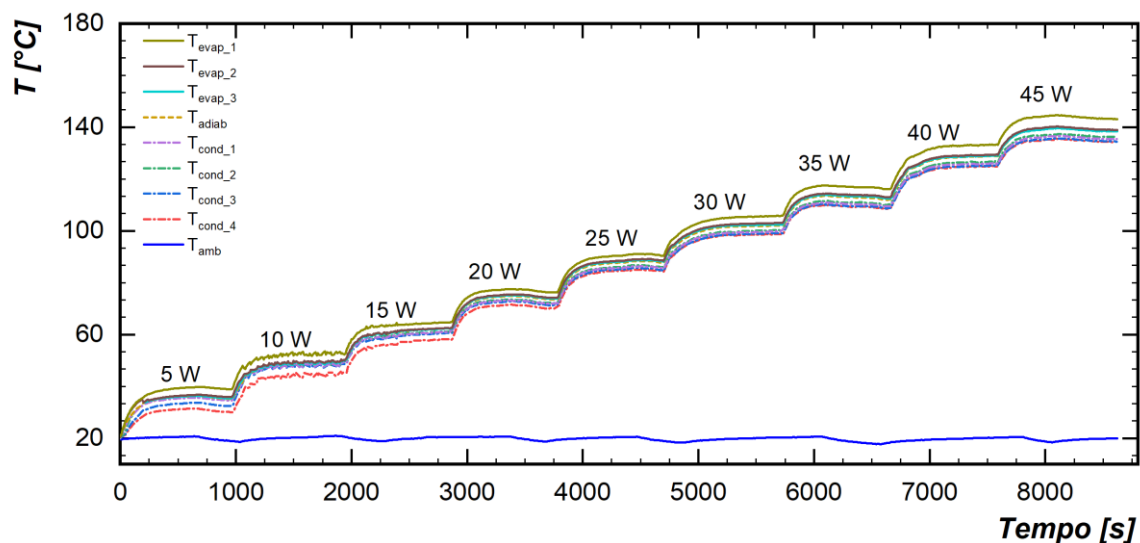
Gráfico C 1: Distribuição da temperatura em função do comprimento para o termossifão com GO 5,0% a 45°



Fonte: Autoria própria (2022)

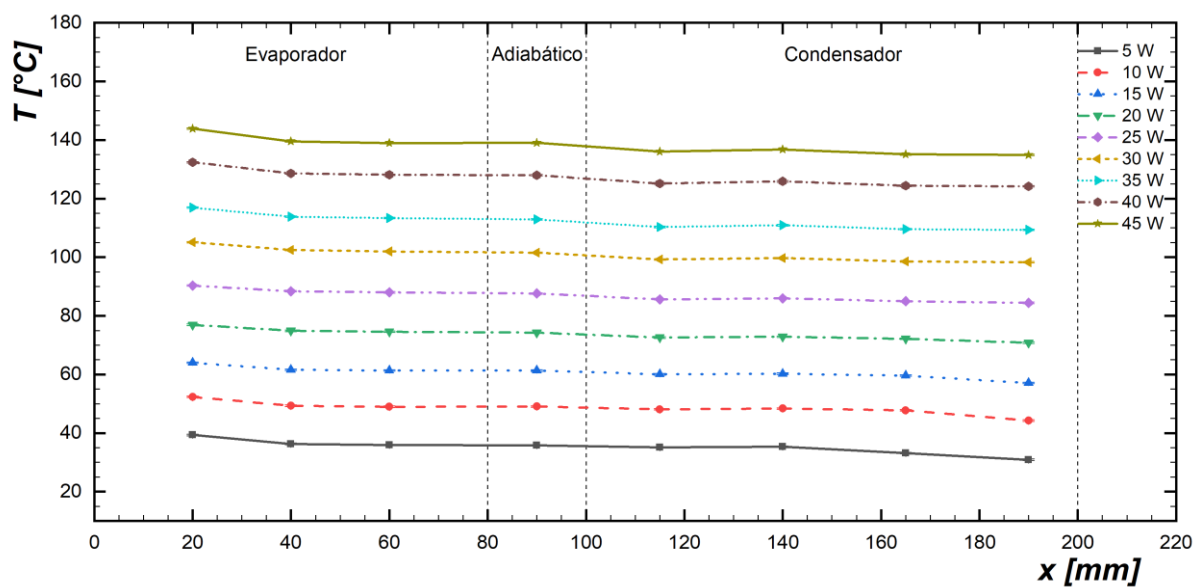
**APÊNDICE D**

Gráfico D 1: Distribuição da temperatura em função do tempo para o termostifão com GO 2,5% a 45°



Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico D 1: Distribuição da temperatura em função do comprimento para o termostifão com GO 2,5% a 45°

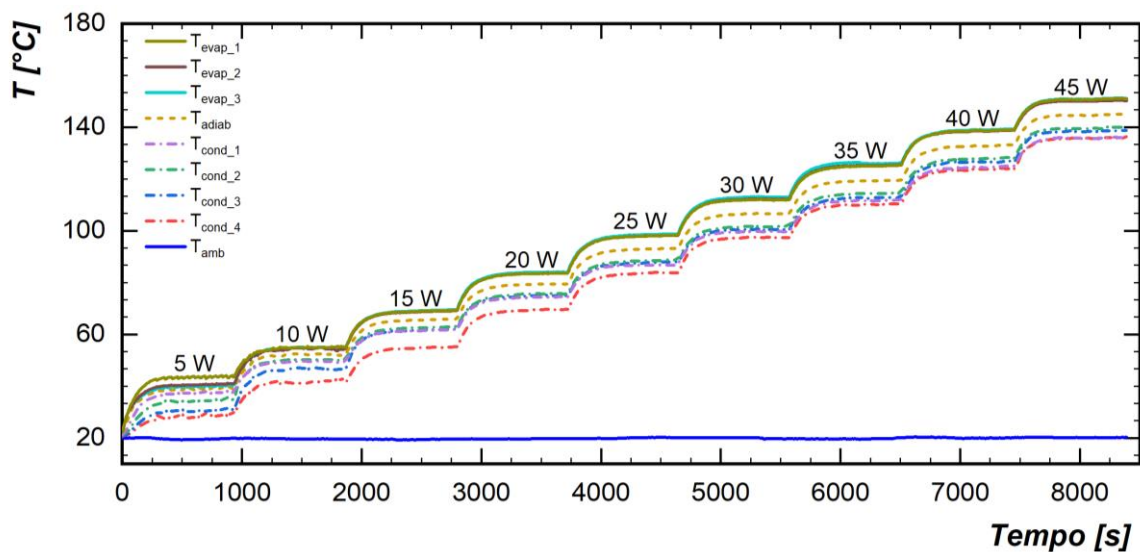


Fonte: Autoria própria (2022)

## APÊNDICE E

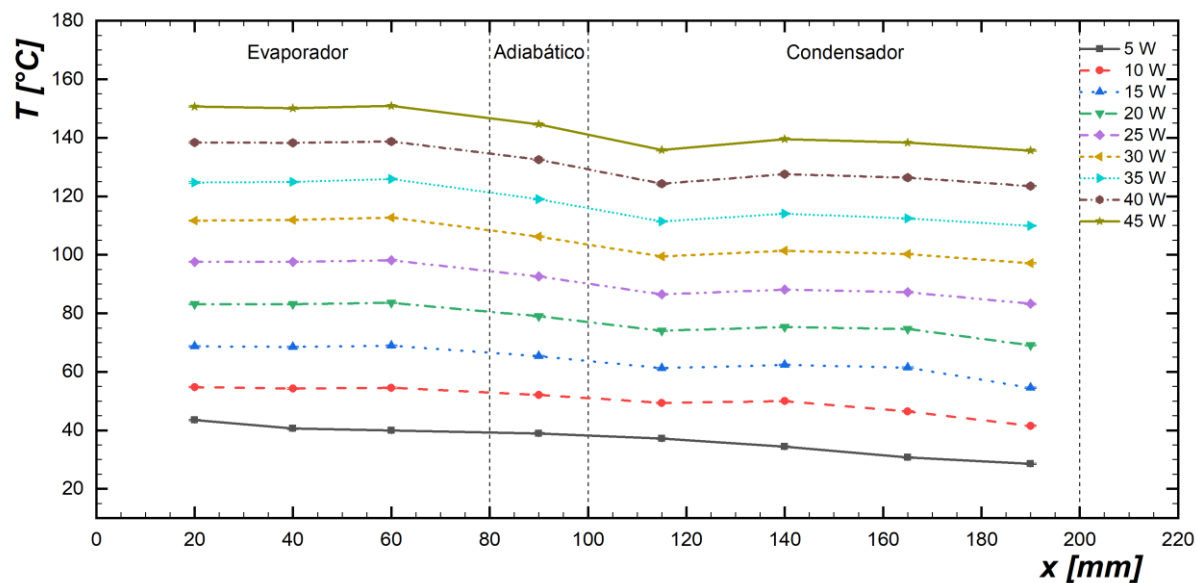


Gráfico E 1: Distribuição da temperatura em função do tempo para o tubo de calor com água a 45°



Fonte: Autoria própria (2022)

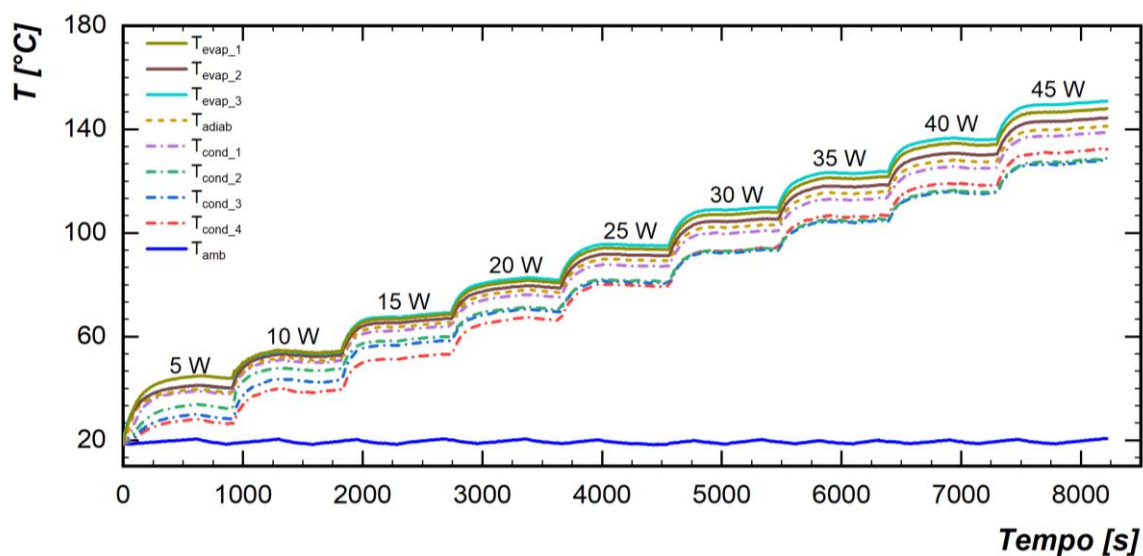
Gráfico E 2: Distribuição da temperatura em função do comprimento para o tubo de calor com água a 45°



Fonte: Autoria própria (2022)

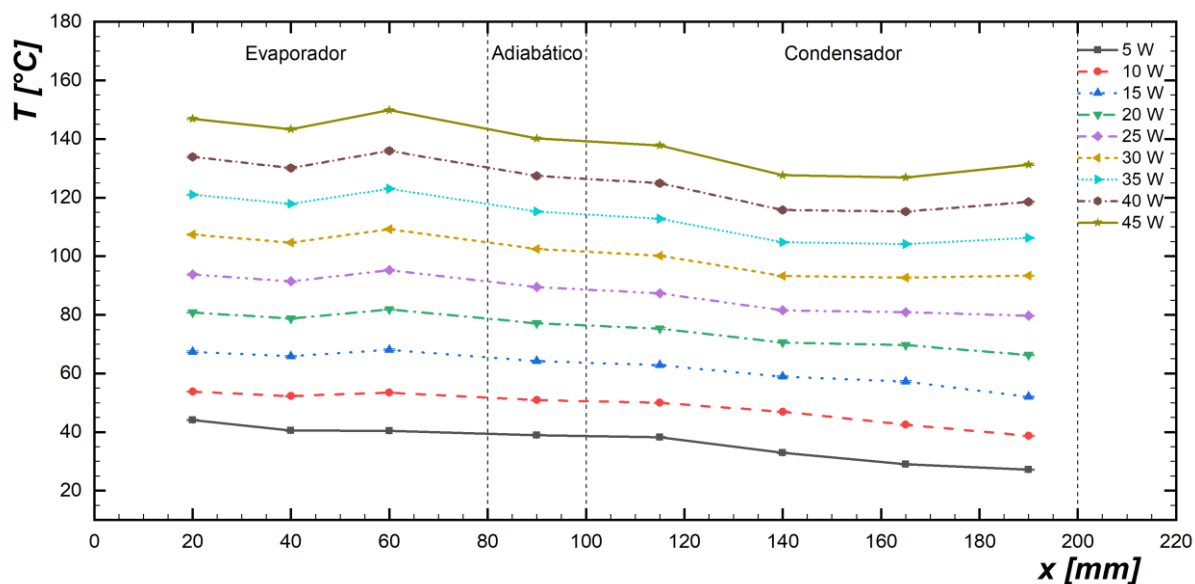
**APÊNDICE F**

**Gráfico F 1: Distribuição da temperatura em função do tempo para o tubo de calor com GO 2,5% a 45°**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico F 2: Distribuição da temperatura em função do comprimento para o tubo de calor com GO 2,5% a 45°**



Fonte: Autoria própria (2022)