

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

GEDLEY KUNAN STREMEL

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO
DE TERMOSSIFÕES COM NANOFLUIDO COMO
FLUIDO DE TRABALHO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

GEDLEY KUNAN STREMEL

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO
DE TERMOSSIFÕES COM NANOFLUIDO COMO
FLUIDO DE TRABALHO**

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 – *Câmpus* Ponta Grossa.

Orientador:

Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves*

Coorientadora:

Eng. Mec. *Larissa Krambeck*

PONTA GROSSA

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE TERMOSSIFÕES COM NANOFLUIDO COMO FLUIDO DE TRABALHO

por

GEDLEY KUNAN STREMEL

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 30 de novembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Thiago Antonini Alves
Orientador

Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos
Membro Titular

Prof. Dra. Rozane de Fátima Turchiello Gomez
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma doaram um pouco de si para que a conclusão deste trabalho se tornasse possível.

Agradeço a minha mãe *Mirian de Fátima Kunan* por toda a dedicação que ela tem comigo, muitas vezes abdicando de fazer coisas para si, para se dedicar a mim, e por sempre me apoiar e incentivar em todo meu caminhar.

À minha avó *Maria Daltiva Vales Kunan* pelo apoio e dedicação em todos os momentos.

À minha namorada, *Renata Maria Oleniki Terra*, por todo apoio, paciência e pelos bons momentos compartilhados ao longo de todos esses anos.

À minha família por ter me dado amizade, carinho e o suporte necessário para a conclusão deste curso.

Ao meu orientador Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves* pelo apoio, incentivo, confiança, paciência, disponibilidade e pela oportunidade dada durante toda a elaboração deste trabalho.

À minha coorientadora Eng. Mec. *Larissa Krambeck*, por toda ajuda durante a realização deste trabalho.

À Instituição pelo ambiente acolhedor que me proporciona há vários anos.

E também a DEUS pelas bênçãos, pela saúde e pela força a qual eu tanto necessitei em todo momento.

RESUMO

STREMEL, Gedley Kunan. **Avaliação Experimental do Desempenho Térmico de Termossifões com Nanofluido como Fluido de Trabalho**. 2017. 77f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa.

Termossifões são dispositivos passivos utilizados na intensificação da transferência de calor operando em ciclo bifásico. Estes dispositivos são capazes de transferir grandes quantidades de energia térmica por meio da transferência de calor, mesmo com pequenos gradientes de temperatura. No setor industrial suas aplicações são em regeneradores de calor, aquecedores de ar de combustão, trocadores de calor, coletores solares, entre outros. Os termossifões são compostos de três regiões, sendo elas, o evaporador, a região adiabática e o condensador, cada uma com suas respectivas funções. O objetivo deste trabalho foi analisar experimentalmente a influência da utilização de nanofluido a base de ouro, na função de aumentar a condutividade térmica do termossifão, comparando seu desempenho com a água deionizada, além de estudar qual concentração do nanofluido apresentou melhor desempenho térmico. Também foi objetivo do trabalho avaliar a melhor inclinação de trabalho do termossifão. Foram confeccionados três termossifões a partir de um tubo de cobre, com 9,45 mm de diâmetro externo, e 7,75 mm de diâmetro interno, onde seu comprimento foi de 200 mm, caracterizando-se pelo evaporador com 80 mm, a região adiabática com 20 mm e o condensador com 100 mm. Os fluidos de trabalho utilizados foram água deionizada e nanofluido de ouro em concentrações de 10% e 20% em água, onde a razão de preenchimento dos termossifões foi de 40% do volume total do evaporador. O aquecimento do evaporador se deu por uma diferença de potencial aplicada a uma fita de liga níquel-cromo e o resfriamento se deu pela convecção forçada a ar. Os testes foram realizados nas posições vertical e 45°, com cargas térmicas aumentando de 5W até a potência máxima de cada fluido de trabalho e diminuindo, consecutivamente, as cargas até a 5W novamente. A partir do resultado, verificou-se que todos os termossifões apresentaram o comportamento adequado, além de constatar a potencialidade destes dispositivos. Também foi constatado que o nanofluido, aplicado ao termossifão como intensificador da condutividade térmica, apresentou valores superiores aos da água deionizada, e que a concentração de 20% possui os melhores valores, cerca de 238% melhores quando comparado à resistência térmica do dispositivo carregado com água. Com relação à inclinação, foi notado que a de 45° obteve os melhores de resistência térmica.

Palavras-chave: Termossifão. Nanofluido. Desempenho Térmico. Fluido de Trabalho. Experimental.

ABSTRACT

STREMEL, Gedley Kunan. **Experimental Evaluation of the Thermal Performance of Thermosyphons with Nanofluid as Working Fluid**. 2017. 77p. Final Course Assignment (Bachelor's Degree in Mechanical Engineering), Federal Technology University of Paraná. Ponta Grossa.

Thermosyphons are passive devices used in the enhancement of heat transfer, operating in two-phase cycle. Such devices are capable of transferring large amount of thermal energy through heat transfer, even with a small temperature gradient. In the industry, its applications are in heat regenerators, combustion air heaters, heat exchangers, solar collectors, among others. Thermosyphons are composed of three regions, the evaporator, the adiabatic region, and the condenser, each one with their respective functions. The objective of this work was to analyze experimentally the influence of the nanofluid's use, based on gold, in function of enhance the thermal conductivity of the thermosyphon, compared its performance with deionized water, besides of study which nanofluid's concentration is presented the best thermal behavior. It was also objective of this work evaluate the best work's tilt of the thermosyphon. The thermosyphons were made from a copper tube with outer diameter of 9.45 mm, and inner diameter of 7.75 mm, with total length of 200 mm, characterized by the evaporator with 80 mm, the adiabatic region with 20 mm and the condenser with 100 mm. The working fluids used were deionized water and gold nanofluid in concentration of 10% and 20% in water, which the tubes' filling ratio were 40% of the volume of the evaporator. The evaporator heating was done from an electric potential applied on a ribbon's nickel-chromium alloy type, and the condenser cooling occurred by forced convection of air. The test were carried out in vertical and 45° positions, with increasing thermal loads between 5W until the maximum power of the working fluid and then decreasing, consecutively, the loads until the initial one. From the showed results, it was verified that all the thermosyphons presented appropriate behavior, besides of verify the potentiality of this devices. It was also noticed that the nanofluid's application as heat booster, showed superior values than the deionized water, and the concentration of 20% in water have the best values, in order of 238% superior when compared the thermal resistance of the device with water. Regarding the tilt, it was noticed that the tilt of 45° had the best values of thermal resistance.

Keywords: Thermosyphon. Nanofluid. Thermal Performance. Working Fluid. Experimental.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo da operação de um termossifão, destacando suas seções e fenômenos físicos presentes.....	19
Figura 2 - Coeficiente de transferência de calor no evaporador (a) e no condensador (b) de um tubo de calor.	26
Figura 3 - Espectro de absorção das nanopartículas de ouro, mostrando o máximo da absorção referente à ressonância de plasma (515 nm).	31
Figura 4 - Imagem obtida através da Técnica de Microscopia de Transmissão Eletrônica (TEM) das nanopartículas de ouro, mostrando que as mesmas possuem um formato preferencialmente esférico com tamanho médio da ordem de (12 ± 2) nm.	31
Figura 5 - Componentes utilizados para a montagem do termossifão: um invólucro, duas tampas e um tubo capilar.	33
Figura 6 - Demonstração da limpeza dos componentes do termossifão em banho ultrassônico.	34
Figura 7 - Demonstração do procedimento de brasagem realizado para a união dos componentes do termossifão.	35
Figura 8 - Demonstração do procedimento de evacuação do termossifão.	36
Figura 9 - Demonstração do procedimento de preenchimento do termossifão.	37
Figura 10 - Demonstração do procedimento de selagem do termossifão.	38
Figura 11 - Aparato experimental utilizado para experimentos nos termossifões.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condutividade térmica de materiais utilizados como nanopartículas.	17
Tabela 2 - Compatibilidade entre fluido de trabalho e materiais do invólucro.	21
Tabela 3 - Condutividade térmica de fluidos convencionais e de nanofluidos.	26
Tabela 4 - Características dos termossifões utilizados para realização dos testes experimentais.	33
Tabela 5 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão, ao longo de seu comprimento, para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem crescente.	42
Tabela 6 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão, ao longo de seu comprimento, para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem decrescente.	42
Tabela 7 - Temperatura de operação e resistência térmica do termossifão, operando com água, para as diferentes cargas térmicas aplicadas em ordem crescente.	44
Tabela 8 - Temperatura de operação e resistência térmica do termossifão, operando com água, para as diferentes cargas térmicas aplicadas em ordem decrescente. ...	44
Tabela 9 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão, para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem crescente.	46
Tabela 10 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão, para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem decrescente.	46
Tabela 11 - Temperatura de operação e da resistência térmica do termossifão, com água como fluido de trabalho, operando com cargas térmicas aplicadas em ordem crescente.	48
Tabela 12 - Temperatura de operação e da resistência térmica do termossifão, com água como fluido de trabalho, operando com cargas térmicas aplicadas em ordem decrescente.	48
Tabela 13 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem crescente.	50
Tabela 14 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem decrescente.	50
Tabela 15 - Temperatura de operação e resistência térmica do termossifão, com nanofluido em concentração de 10%, para cargas térmicas atribuídas em ordem crescente.	52

Tabela 16 - Temperatura de operação e resistência térmica do termossifão, com nanofluido em concentração de 10%, para cargas térmicas decrescentes.....	52
Tabela 17 - Temperaturas registradas em regime quase permanente ao longo do termossifão, com nanofluido a 10% de concentração, operando em cargas crescentes.....	54
Tabela 18 - Temperaturas em regime quase permanente obtidas no funcionamento ao longo do termossifão, com nanofluido a 10% de concentração, operando em cargas decrescentes.	54
Tabela 19 - Temperatura da região adiabática e resistência térmica do termossifão, operando com nanofluido em concentração de 10%, na inclinação de 45°, para cargas térmicas crescentes.....	55
Tabela 20 - Temperatura da região adiabática e resistência térmica do termossifão, operando com nanofluido em concentração de 10%, na inclinação de 45°, para cargas térmicas decrescentes.....	56
Tabela 21 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem crescente.	57
Tabela 22 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem decrescente.	57
Tabela 23 - Temperatura de operação e resistência térmica do termossifão, operando com nanofluido com 20% de concentração, para as diferentes cargas térmicas aplicadas em ordem crescente.	59
Tabela 24 - Temperatura de operação e resistência térmica do termossifão, operando com nanofluido com 20% de concentração, para as diferentes cargas térmicas aplicadas em ordem decrescente.	59
Tabela 25 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão, com inclinação de 45°, para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem crescente.....	60
Tabela 26 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão, com inclinação de 45°, para as diferentes cargas térmicas em ordem decrescente.....	61
Tabela 27 - Temperatura de operação e resistência térmica do termossifão, operando com nanofluido com 20% de concentração, para as diferentes cargas térmicas aplicadas em ordem crescente.	62

Tabela 28 - Temperatura de operação e resistência térmica do termossifão, operando com nanofluido com 20% de concentração, para as diferentes cargas térmicas aplicadas em ordem decrescente.63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Temperatura de operação de compostos para seleção do fluido de trabalho.	22
Gráfico 2 - Comportamento das temperaturas em função do tempo para as diferentes cargas térmicas atribuídas.....	41
Gráfico 3 - Distribuição das temperaturas ao longo do termossifão para cargas térmicas crescente.	43
Gráfico 4 - Distribuição das temperaturas ao longo do termossifão para os diferentes cargas térmicas decrescentes.....	43
Gráfico 5 - Distribuição das temperaturas ao longo do termossifão para as diferentes cargas térmicas atribuídas.	45
Gráfico 6 - Distribuição das temperaturas do termossifão em função de seu comprimento, para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem crescente...	47
Gráfico 7 - Distribuição das temperaturas do termossifão em função de seu comprimento, para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem decrescente.	47
Gráfico 8 - Distribuição das temperaturas ao longo do termossifão em função do tempo para as diferentes cargas térmicas atribuídas.....	49
Gráfico 9 - Temperatura de regime quase permanente em função do comprimento do termossifão, com cargas térmicas aplicadas em ordem crescente.	51
Gráfico 10 - Temperatura de regime quase permanente em função do comprimento do termossifão para as diferentes cargas em ordem decrescente.	51
Gráfico 11 - Comportamento das temperaturas ao longo do termossifão, com nanofluido 10%, com inclinação de 45°.....	53
Gráfico 12 - Temperaturas registradas em regime quase permanente em função do comprimento do termossifão operando em cargas crescentes.	54
Gráfico 13 - Temperaturas registradas em regime quase permanente em função do comprimento do termossifão operando em cargas decrescentes.	55
Gráfico 14 - Distribuição das temperaturas ao longo do termossifão, em posição vertical, em função do tempo e da carga térmica atribuída.	56
Gráfico 15 - Distribuição das temperaturas em função do comprimento do termossifão para as diferentes potências dissipadas em ordem crescente.	58

Gráfico 16 - Distribuição das temperaturas em função do comprimento do termossifão para as diferentes potências dissipadas em ordem decrescente.	58
Gráfico 17 - Distribuição das temperaturas ao longo do termossifão, com inclinação de 45°, em função do tempo e da carga térmica atribuída.	60
Gráfico 18 - Distribuição das temperaturas ao longo do termossifão para carga térmica crescente.	61
Gráfico 19 - Distribuição das temperaturas ao longo do termossifão para o carga térmica decrescente.	62
Gráfico 20 - Comparação da resistência térmica dos termossifões expostos a cargas térmicas crescentes.	64
Gráfico 21 - Comparação da resistência térmica dos termossifões expostos a cargas térmicas decrescentes.	65
Gráfico 22 - Comparação da condutividade térmica dos termossifões com os diferentes fluidos de trabalho.	66
Gráfico 23 - Comparação da condutividade térmica efetiva dos termossifões com os diferentes fluidos de trabalho.	66
Gráfico 24 - Comparação da resistência térmica para fluxos crescentes (INC) e decrescentes (DEC) para o nanofluido com 20% de concentração em água.	67
Gráfico 25 - Comparação da resistência térmica para fluxos crescentes (INC) e decrescentes (DEC) para o nanofluido com 10% de concentração em água.	68
Gráfico 26 - Comparação da resistência térmica para fluxos crescentes (INC) e decrescentes (DEC) para a água deionizada.	68
Gráfico 27 - Resistências térmicas apresentadas pelos termossifões com diferentes fluidos de trabalho, operando com cargas térmicas crescentes.	69
Gráfico 28 - Resistências térmicas apresentadas pelos termossifões com diferentes fluidos de trabalho, operando com cargas térmicas decrescentes.	70
Gráfico 29 - Comparação da condutividade térmica dos termossifões com diferentes fluidos de trabalho, operando com cargas térmicas crescentes.	71
Gráfico 30 - Comparação da condutividade térmica efetiva dos termossifões operando com diferentes fluidos de trabalho, com cargas térmicas decrescentes. ..	72
Gráfico 31 - Comparação da resistência térmica para fluxos crescentes (INC) e decrescentes (DEC) nanofluido com 20% de concentração.	73
Gráfico 32 - Comparação da resistência térmica para fluxos crescentes (INC) e decrescentes (DEC) para o nanofluido com 10% de concentração em água.	73

Gráfico 33 - Comparação da resistência térmica para fluxos crescentes (INC) e decrescentes (DEC) para a água deionizada.....74

LISTA DE SÍMBOLOS

Abreviaturas

<i>CNT</i>	Nanotubo de Carbono
<i>DAMEC</i>	Departamento Acadêmico de Mecânica
<i>LabCT</i>	Laboratório de Controle Térmico
<i>TBF</i>	Termossifões Bifásicos Fechados
<i>TEM</i>	Técnica Microscópica de Transmissão
<i>UTFPR</i>	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Letras Latinas

d_e	Diâmetro Externo	[m]
d_i	Diâmetro Interno	[m]
q	Taxa de transferência de calor	[W]
R	Resistência Térmica	[°C/W]
ΔT	Diferença de Temperatura	[°C]

Subscritos

<i>adiab</i>	Seção adiabática
<i>amb</i>	Ambiente
<i>cond</i>	Condensador
<i>evap</i>	Evaporador

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA	17
1.2	OBJETIVO	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	18
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM TERMOSSIFÃO	19
2.2	COMPONENTES DE UM TERMOSSIFÃO	20
2.2.1	Invólucro	20
2.2.2	Fluido de Trabalho	21
2.3	RESISTÊNCIA TÉRMICA	22
2.4	NANOTECNOLOGIA: CONCEITOS HISTÓRICOS	23
2.5	SINTETIZAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS	24
2.6	NANOFLUIDOS	25
2.7	CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM NANOFLUIDOS	27
2.7.1	Composição Da Partícula	27
2.7.2	Efeito do Tamanho da Partícula	27
2.7.3	Efeito Da Forma Da Partícula	28
2.7.4	Efeito Da Temperatura	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	SINTESE DO NANOFLUIDO	30
3.2	CARACTERÍSTICAS DO NANOFLUIDO	30
3.3	OBTENÇÃO DO NANOFLUIDO COMO FLUIDO DE TRABALHO	32
3.4	CONSTRUÇÃO DO TERMOSSIFÃO	32
3.4.1	Característica Dos Termossifões	32
3.4.2	Limpeza Dos Termossifões	34
3.4.3	Montagem Dos Termossifões	34
3.4.4	Teste De Estanqueidade	35
3.4.5	Processo De Evacuação	35

3.4.6	Preenchimento Dos Termossifões	36
3.5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	38
3.5.1	Termopares.....	38
3.5.2	Resistência Elétrica.....	38
3.5.3	Isolamento Do Evaporador.....	39
3.5.4	Isolamento Da Região Adiabática	39
3.5.5	Resfriamento Do Condensador.....	39
3.5.6	Aparato Experimental.....	39
3.5.7	Procedimento Experimental	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1	TERMOSSIFÃO EM ÁGUA	41
4.1.1	Posição Vertical (90°).....	41
4.1.2	Posição 45°	44
4.2	TERMOSSIFÃO EM NANOFLUIDO 10%	49
4.2.1	Posição Vertical (90°).....	49
4.2.2	Posição De 45°	52
4.3	TERMOSSIFÃO EM NANOFLUIDO 20%	56
4.3.1	Posição Vertical	56
4.3.2	Posição 45°	59
4.4	COMPARAÇÃO ENTRE OS TERMOSSIFÕES.....	63
4.4.1	Posição Vertical (90°).....	63
4.4.1.1	Comparação Entre Os Fluidos De Trabalho	63
4.4.1.2	Comparação Entre A Configuração Do Fluxo De Calor	67
4.4.2	Posição De 45°	69
4.4.2.1	Comparação Entre Os Fluidos De Trabalho	69
4.4.2.2	Comparação Entre A Configuração Do Fluxo De Calor	72
5	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

Os termossifões são dispositivos passivos utilizados na intensificação da transferência de calor, onde seu princípio de funcionamento consiste na retirada de calor de uma fonte quente, transferindo-se para uma fonte fria, operando em ciclo bifásico. A transferência de calor é feita a partir da mudança de fase do fluido de trabalho, o qual possui alta capacidade de absorver e liberar energia, esse processo é denominado calor latente de vaporização (AGUIAR, 2016).

Estes dispositivos passivos de transferência de calor se tornam muito úteis em diversas aplicações, visto que possuem uma condutividade térmica de 10 a 50 vezes superior a uma barra maciça de mesmas dimensões e material metálico (KRAMBECK, 2016). Tal comportamento se dá pelo fato de que a resistência térmica ao fluxo de calor é mínima, tornando o gradiente de temperaturas ao longo do termossifão muito pequeno.

Um termossifão se divide entre dois componentes principais, um invólucro, que tem a função de proteger o fluido de trabalho do meio externo, além de implicar na própria seleção do fluido, e um fluido de trabalho, que tem papel determinante, pois é sua vaporização e condensação que garante o funcionamento do termossifão (MANTELLI, 2009).

Dentre os fluidos de trabalho que podem ser utilizados em um termossifão podem-se destacar os nanofluidos, que se caracterizam pela adição de nanopartículas a um fluido-base específico. Este composto tem sido muito estudado nos últimos anos pelo fato de possuir uma condutividade térmica muito superior quando comparado à do fluido-base (MENEZES, 2015). Keblinski *et al.* (2005) realizaram um estudo adicionando uma pequena quantidade de nanopartículas de cobre em uma solução de etilenoglicol e outra com óleo, e essa adição resultou no aumento da condutividade térmica do líquido, em comparação com a água, em cerca de 40% no caso do etilenoglicol e em cerca de 150% na condutividade do óleo.

O estudo realizado por Oliveira (2011) mostra os principais materiais utilizados como nanopartículas, bem como suas condutividades térmicas, como indicado na Tabela 1. Com estes dados, pode ser percebido que a adição de nanopartículas de ouro em fluidos-base é justificável, visto que o material possui uma condutividade térmica alta.

Tabela 1 - Condutividade térmica de materiais utilizados como nanopartículas.

Material	Condutividade Térmica [W/m²K]
Nanotubos de Carbono (CNT)	3000
Prata	426
Ouro	317
Alumina (Al ₂ O ₃)	40
Óxido de Cobre (CuO)	18
Óxido de Titânio (TiO ₂)	13,7

Fonte: Adaptado de Oliveira (2011).

Uma das vantagens que o termossifão possui em relação a outros dispositivos passivos (tubos de calor) se caracteriza pelo fato da gravidade estar presente no retorno do fluido ao evaporador, neste caso, dispensando o uso de bombeamento capilar. Além disso, pelo fato do evaporador e o condensador trabalharem de forma independente, existe a possibilidade de fabricação com diferentes áreas de transferência de calor, além de uma gama de geometrias diferentes para sua construção (FAGHRI, 2014).

1.1 JUSTIFICATIVA

Dentre os dispositivos passivos de transferência de calor, o termossifão é um dos que estão presentes no mercado, pois possui diversas vantagens com relação aos outros sistemas de troca térmica, como a facilidade de fabricação, o baixo custo dos componentes que o compõe, a alta condutividade térmica, baixas quedas de pressão, dispensa bombeamento de energia, além de operar com pequenas variações de temperatura. As nanopartículas adicionadas a um fluido convencional melhoram a condutividade térmica do fluido e, desta forma, aumentam o desempenho de um dispositivo muito eficaz como o termossifão, gerando novas faixas de aplicação e operação em equipamentos diversos.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste Trabalho de Conclusão de Curso é realizar a avaliação experimental do desempenho térmico de termossifões com nanofluido de ouro, com diferentes concentrações, como fluido de trabalho, comparando seu desempenho frente à água deionizada, nas posições vertical (90°) e inclinada (45°).

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- i. Projetar e construir termossifões de cobre com diferentes fluidos de trabalho;
- ii. Testar experimentalmente os termossifões com água e nanofluido à base de ouro como fluido de trabalho;
- iii. Testar experimentalmente os termossifões com diferentes angulações e sob diversas cargas térmicas;
- iv. Comparar o desempenho térmico dos termossifões com diferentes fluidos de trabalho e inclinações de trabalho;
- v. Determinar o fluido de trabalho que tem o melhor comportamento no que diz respeito à transferência de calor.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica foi subdividido em 5 Capítulos.

No Capítulo 1, foram apresentadas a contextualização dos termossifões, a motivação e os objetivos deste trabalho.

O Capítulo 2 apresentará uma descrição do princípio de funcionamento e dos principais componentes de um termossifão e uma revisão da literatura associada a termossifões. Além disso, serão apresentados os conceitos históricos sobre nanotecnologia e uma revisão sobre nanofluidos como fluido de trabalho.

No Capítulo 3, serão apresentados as características dos nanofluidos, o processo de obtenção, o processo de construção dos termossifões, o aparato utilizado e os procedimentos de testes na etapa experimental.

No Capítulo 4, serão apresentados os resultados do desempenho térmico dos termossifões com diferentes fluidos de trabalho e angulações e uma comparação entre eles.

O Capítulo 5 apresentará as conclusões deste Trabalho de Conclusão de Curso e as sugestões para trabalhos futuros.

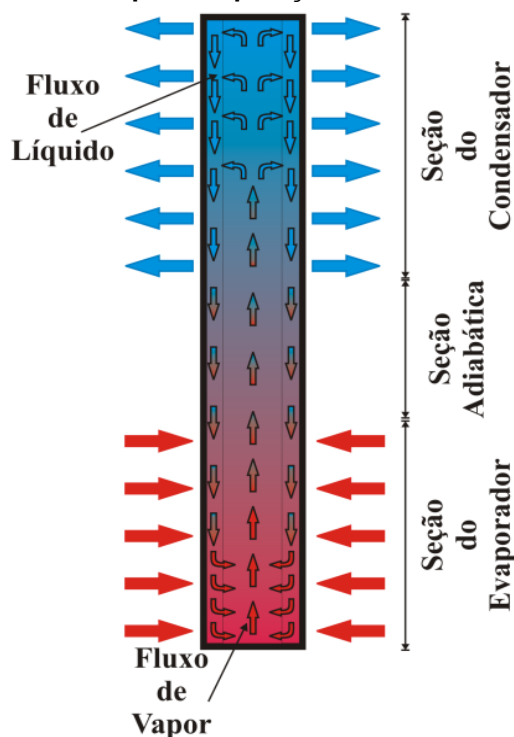
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados os conceitos referentes ao princípio de funcionamento de um termossifão e seus principais componentes. Além disso, será apresentada uma revisão bibliográfica sobre nanotecnologia e sua aplicação na formulação de nanofluidos.

2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM TERMOSSIFÃO

O funcionamento de um termossifão pode ser facilmente compreendido utilizando uma geometria cilíndrica, como mostrado na Figura 1, porém os termossifões podem assumir diferentes formas (FAGHRI, 2014).

Figura 1 - Exemplo da operação de um termossifão.



Fonte: Autoria Própria.

Os termossifões bifásicos fechados (TBF) são constituídos de três regiões de destaque, o evaporador, onde ocorre absorção do calor cedido ao sistema, o condensador, o qual é a região de transferência de calor para o ambiente externo, e, uma região isolada, chamada de região adiabática, onde não ocorre trocas de calor com o ambiente e sua utilização é necessária ou não, dependendo da aplicação (BRITO FILHO, 2007).

Durante o seu funcionamento, energia na forma de calor é adicionada no evaporador, onde o aquecimento do fluido de trabalho gera vapor o qual, por diferença de pressão, se desloca para as regiões de menor temperatura, ou seja, para o condensador. Nessa etapa, há a retirada de calor para o ambiente externo, e também o processo de condensação do vapor, onde o mesmo retorna à região de evaporação por gravidade, fechando o ciclo (MANTELLI, 2009).

2.2 COMPONENTES DE UM TERMOSSIFÃO

Como mencionado anteriormente, um termossifão é composto por dois componentes, sendo eles um invólucro e um fluido de trabalho, onde estes devem possuir características química e mecanicamente compatíveis entre si e a escolha correta é importante para o funcionamento correto do dispositivo passivo de transferência de calor. O invólucro é um tubo oco, podendo ser fabricado de diferentes materiais, tais como metais ou cerâmicos. O fluido de trabalho pode variar dependendo da faixa de operação, sendo composto desde metais líquidos para operações em temperaturas elevadas, até nitrogênio líquido, quando sua utilização ocorre em baixas temperaturas. Além da compatibilidade com o invólucro e de sua temperatura de operação, outros fatores como pressão de vapor, condutividade térmica, estabilidade, toxicidade são importantes na seleção do fluido de trabalho (REAY *et al.*, 2014).

2.2.1 Invólucro

Segundo Krambeck (2016), o invólucro tem a função de isolar o fluido de trabalho do ambiente externo e a inter-relação entre eles é de grande importância, visto que o fluido gera pressões de vapor sobre as paredes do envoltório, logo, quanto maior a pressão de vapor, maior deverá ser a espessura da parede. A escolha de uma geometria apropriada também é um fator essencial no que diz respeito à resistência à pressão de vapor, visto que geometrias cilíndricas são mecanicamente mais rígidas do que quadradas.

Como citado, a compatibilidade mecânica e química entre o fluido de trabalho e o material do invólucro é parte importante no projeto de termossifões, visto que reações químicas, que ocorrem entre componentes, podem gerar gases não condensáveis. Estes gases deslocam-se para a região mais extrema do

termossifão, e conseqüentemente bloqueiam parte do condensador, prejudicando o desempenho térmico do dispositivo passivo de transferência de calor (PETERSON, 1994). A Tabela 2 apresenta uma relação recomendada entre eles.

Tabela 2 - Compatibilidade entre fluido de trabalho e materiais do invólucro.

Fluido de Trabalho	Material Recomendado	Material Não-Recomendado
Amônia	Alumínio Aço Carbono Níquel Aço Inoxidável	Cobre
Acetona	Cobre Sílica Alumínio Aço Inoxidável	–
Metanol	Cobre Aço Inoxidável Sílica	Alumínio
Água	Cobre Monel Aço Inoxidável 347	Alumínio Sílica Inconel Níquel Aço Carbono
Potássio	Aço Inoxidável Inconel	Titânio
Sódio	Aço Inoxidável Inconel	Titânio

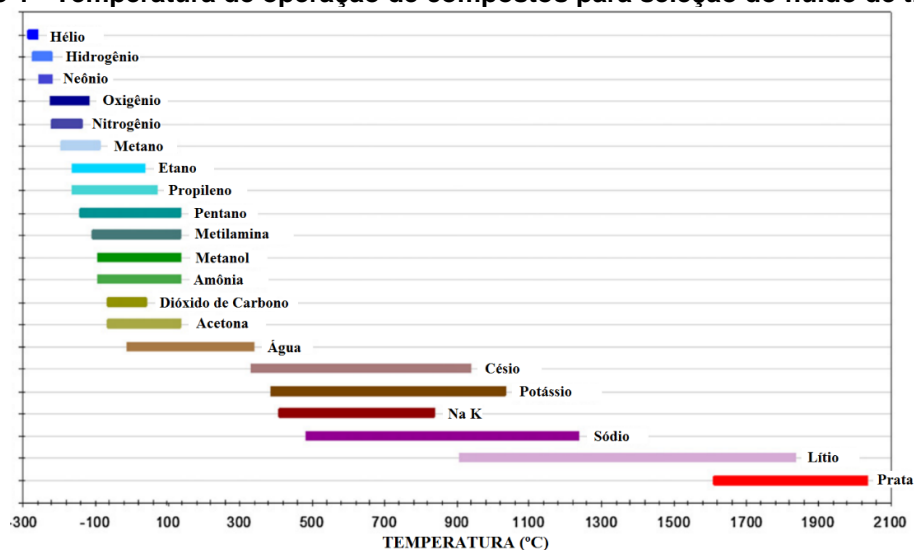
Fonte: adaptado de Mantelli (2009).

2.2.2 Fluido de Trabalho

Durante a operação de um termossifão o fluido de trabalho tem relevância fundamental, haja vista que a transferência de calor se dá pela alteração de seu estado físico de líquido para vapor, ou seja, do calor fornecido através do calor latente de vaporização do fluido de trabalho. Desta forma, sua seleção deve ser criteriosa (RUSSO, 2017).

Dentre os fatores fundamentais para selecionar um fluido de trabalho, destaca-se a temperatura de operação, dado que a temperatura de ebulição do fluido de trabalho deve ser compatível com o nível de temperatura de operação (PETERSON, 1994). Portanto, o Gráfico 1 mostra a temperatura de operação para os principais fluidos de trabalho utilizados em termossifões.

Gráfico 1 - Temperatura de operação de compostos para seleção do fluido de trabalho.



Fonte: Nishida (2016).

É interessante destacar também que o fluido de trabalho pode operar entre as temperaturas críticas e de estado triplo, sendo que, operando em temperaturas superiores à temperatura crítica, o fluido se comporta no estado de plasma, onde o aumento de temperatura não configura um aumento na pressão. Em temperaturas inferiores à temperatura de estado triplo, o fluido de trabalho equilibra-se entre os estados de líquido e de vapor (AGUIAR, 2016).

Segundo Da Silva (2010), a presença de nanopartículas dispersas em um fluido-base não interfere no seu calor latente de vaporização, tampouco em sua tensão superficial, desta forma a utilização de nanofluidos têm a capacidade de melhorar a transferência de calor do sistema, desde que a troca térmica por convecção e condensação desempenhe papel importante. Com isso, a temperatura de operação dos fluidos-base é semelhante à de seu nanofluido.

2.3 RESISTÊNCIA TÉRMICA

Reay *et al.* (2014) define que a resistência térmica global (R_t) de um termosifão, indicada pela Equação 1, é definida como a razão entre diferença de temperatura entre a região do evaporador e do condensador (ΔT) e a taxa de transferência de calor (q). Em outras palavras, refere-se à facilidade que o dispositivo tem de transportar energia na forma de calor. Quanto maior a resistência, maior a dificuldade do sistema em transportar calor e, conseqüentemente, maior será a diferença de temperaturas entre o condensador e o evaporador.

$$R_t = \frac{\Delta T}{q} = \frac{T_{evap} - T_{cond}}{q}. \quad (1)$$

2.4 NANOTECNOLOGIA: CONCEITOS HISTÓRICOS

Recentemente o estudo da nanotecnologia vem ganhando vários adeptos, fato esse que corrobora com sua vasta área de aplicações, dentre elas Schaming (2015) destaca produtos nanoeletrônicos, indústria automotiva, cosméticos, construção civil e medicina. Porém, a utilização de nanopartículas pode ser observada há séculos, e suas propriedades vêm sendo estudadas desde a década de 1950.

Conforme afirma Schaming (2015), recentes estudos científicos observam a presença de nanopartículas metálicas em produtos manufaturados pelos egípcios e mesopotâmios durante os Séculos III e IV, onde a presença de nanopartículas de cobre atribuía colorações vermelhas aos vidros.

Alguns séculos depois, durante a Idade Média, notou-se a presença de nanopartículas de cobre, ouro e prata em vitrais que decoravam as grandes catedrais da época, onde segundo Brill (1965) pela característica de dispersão coloidal dos metais, a cor vermelha dos vitrais se dava na presença de partículas de ouro e a coloração verde na presença de partículas de prata. Acredita-se que, segundo Freestone *et al.* (2007), a redução de prata e ouro em nanopartículas se dava na presença de antimônio.

Segundo Hulla (2015), o contato humano com nanopartículas não é recente e ocorre durante boa parte da história humana, sendo que há um considerável aumento desse contato após a revolução industrial, esse contato levou *Richard Zsigmondy*, em 1925, a propor o termo “nanômetro” como unidade de medida. Hulla (2015) atribui ainda o começo dos estudos sobre nanotecnologia a *Richard Feynman* que em 1959 apresentou um estudo introduzindo o conceito de manipulação de compostos em nível atômico. Já o conceito nanotecnologia foi concebido por *Norio Taniguchi* em 1974 (SCHAMING, 2015).

O conhecimento acerca da nanotecnologia levou ao conceito de nanomateriais, o qual é definido por Schaming (2015) como sendo objetos que

possuem dimensões na escala nanométrica. Além disso, estes produtos são subdivididos em três tipos: nanopartículas, nanotubos e nanofilmes, onde a diferença entre eles é a grandeza na escala nano. O presente trabalho irá tratar apenas o primeiro tipo de produto: nanopartículas.

Gupta *et al.* (2012) afirmam que devido à sua característica nanoestrutural, os nanomateriais apresentam propriedades mecânicas, térmicas, físicas e químicas superiores aos materiais convencionais. Tsai *et al.* (2004) afirmam que a suspensão de partículas em fluidos de trabalho tem mostrado um grande potencial no aumento da transferência de calor. Além disso, materiais na escala nanométrica (nanopartículas) estão recebendo grande atenção como mecanismos de aprimoramento da transferência de calor devido as suas diferentes formas e tamanhos.

Dentre os ramos possíveis para nanopartículas, este Trabalho de Conclusão de Curso faz menção à utilização destas como fluido de trabalho, conhecidos como nanofluidos.

2.5 SINTETIZAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS

A sintetização de nanopartículas pode ser obtida por dois processos distintos, o processo *top-down*, que se dá pela remoção de partículas do composto em seu estado natural até tamanho nano desejado e o processo *bottom-up*, que é resultado do acoplamento de um composto molecular até o mesmo atingir o tamanho nano (HWANG, 2014).

Cada processo possui suas vantagens e desvantagens, o processo *top-down* consegue criar nanopartículas bem definidas e com tamanhos diversos, porém demanda de processos complexos, além do fato de ser um processo relativamente mais oneroso. Enquanto o processo *bottom-up* tem a facilidade de produzir nanopartículas com uma gama de formas e geometrias diferentes, porém apresenta dificuldades de sintetizá-las em formato bem definido (HWANG, 2014).

Destaca-se, também, a sintetização de nanopartículas à verde, que estão sendo estudadas em trabalhos mais recentes. A mesma recebe este nome, pois são produzidas a partir da utilização de extratos de vegetais, bactérias e fungos, onde se observa uma tendência pela utilização do primeiro método, fato esse justificado por

não necessitar de requerimentos ambientais para a fabricação de amostras vegetais. Além disso, a sintetização à verde apresenta algumas vantagens sobre os métodos convencionais de fabricação, pelo fato de reduzir o desperdício de produtos químicos, possuir menor toxicidade e consumo de energia para a sintetização (JOHN, 2015).

2.6 NANOFUIDOS

Um estudo preliminar sobre a condutividade térmica de nanofluidos foi realizado por Choi (1995), onde é descrito que o aumento da transferência de calor em fluidos convencionais é proporcional ao aumento de sua potência de bombeamento. Quando se utilizam nanofluidos, nas mesmas condições dos fluidos convencionais, se observa um aumento de sua transferência de calor, contudo, há uma queda drástica na potência de bombeamento comparado aos fluidos convencionais.

Buschmann (2014) afirma que a limitação de fontes de obtenção de energia está abrindo portas para tecnologias inovadoras para transporte e transferência de calor. Também, destaca-se que a utilização de nanofluidos é uma destas novas tecnologias, devido ao seu potencial de aprimoramento da transferência de calor.

Wang (2006) corrobora com a informação de que o potencial de transferência de calor dos nanofluidos é elevado, tanto que os nanofluidos podem ser considerados uma nova geração de fluidos de trabalho, onde oferecem oportunidades de aumento da transferência de calor quando comparados com fluidos convencionais.

Gupta *et al.* (2012) afirmam que é evidente a melhora das características termofísicas dos nanofluidos sendo uma destas características o aumento da condutividade térmica. Descreve-se também que a modificação de características no nanofluido, tais como a fração volumétrica, o tamanho e a forma da nanopartícula, podem alterar as propriedades térmicas. A Tabela 3 apresenta a comparação da condutividade térmica de fluidos de trabalho convencionais e os mesmos com a adição de nanopartículas.

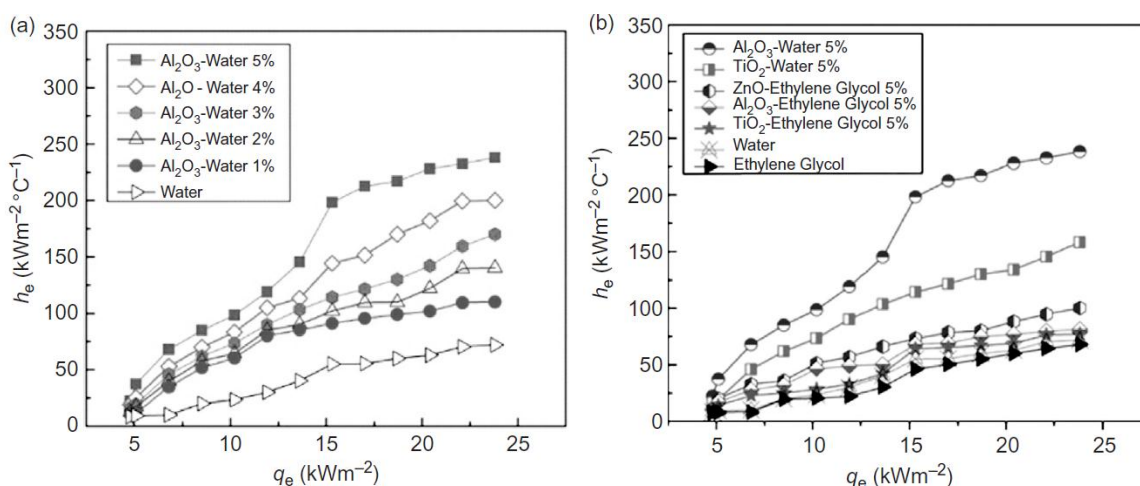
Tabela 3 - Condutividade térmica de fluidos convencionais e de nanofluidos.

Materiais	Condutividade Térmica [W/m ² K]	
	Fluidos Base	Água
Etilenoglicol (EG)		0,253
Óleo		0,145
Nanofluidos (% Concentração)	Água-Alumina (1,50)	0,629
	EG-Alumina (3,00)	0,278
	EG-Água-Alumina (3,00)	0,382
	Água-TiO ₂ (0,75)	0,682
	Água-CuO (1,00)	0,619

Fonte: adaptado de Gupta *et al.* (2012).

Reay *et al.* (2014) afirmam que a adição de nanopartículas em solução com o fluido-base resulta em uma melhora significativa na transferência de calor de um tubo de calor ou termossifão quando comparado com as propriedades destes isolados. Características como a diminuição da resistência térmica e o aumento da condutividade térmica são fatores que explicam essa melhora na transferência de calor. Testes experimentais indicaram que o coeficiente de transferência de calor é significativamente melhorado quando adicionado nanopartículas, tanto no evaporador quanto no condensador, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Coeficiente de transferência de calor no evaporador (a) e no condensador (b) de um tubo de calor.



Fonte: Reay *et al.* (2014)

Percebe-se na Figura 2(a), qual se analisa um evaporador de um tubo de calor, que o aumento da concentração do nanofluido interfere no desempenho da transferência de calor, sendo que em maiores concentrações (5%) o coeficiente de transferência de calor apresentou-se com valores superiores às concentrações

subjacentes. Na Figura 2(b), a análise de transferência de calor no condensador de um tubo de calor é feita comparando fluidos-base e nanofluidos em concentrações de 5%, e novamente percebe-se que a adição de nanopartículas indica um aumento do coeficiente de troca térmica.

2.7 CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM NANOFLUIDOS

Da Silva (2010) realizou um trabalho acerca da condutividade térmica de nanofluidos, onde foram analisados resultados experimentais obtidos por diversos estudos. O autor atribui o aumento da condutividade térmica a diversos fatores, tais como a fração volumétrica, tamanho e forma da partícula, composição do fluido-base e da partícula e a temperatura.

2.7.1 Composição da Partícula

A interferência da composição da partícula na condutividade térmica é observada pela própria condutividade da nanopartícula. No caso de óxidos, que apresentam característica inferior, os valores obtidos na análise da condutividade térmica são inferiores às apresentadas pelos metais, que por sua vez apresentam-se inferiores às dos nanotubos de carbono. Desta forma, percebe-se que a condutividade térmica de um composto é inversamente proporcional à sua fração volumétrica, de tal modo que, para que um óxido apresente condutividade semelhante aos metais, necessita-se de uma maior fração volumétrica do mesmo em solução (DA SILVA, 2010).

2.7.2 Efeito do Tamanho da Partícula

O tamanho da partícula é diretamente proporcional à área superficial, de tal modo que partículas de menor tamanho distribuem-se mais uniformemente do que as maiores. Desta forma acreditava-se que a diminuição do tamanho das partículas implicaria em um aumento da condutividade térmica do fluido, porém, estudos mais recentes indicam que há um limite na interferência do tamanho da partícula com relação à melhora de sua condutividade (DA SILVA, 2010).

O transporte de calor para partículas sólidas é feito através de pacotes de onda, denominados fonões, os quais realizam o transporte de energia através da estrutura cristalina do sólido. Da Silva (2010) afirma que, quando o tamanho médio da partícula se equipara ou é inferior com o tamanho dos fonões, as mesmas criam uma resistência à passagem de energia, e este fenômeno resulta na diminuição da condutividade térmica do fluido.

Um estudo realizado por Xie (2002) com nanopartículas de alumina (Al_2O_3) em solução com etilenoglicol indica que há uma redução na condutividade térmica da solução a partir de um tamanho de partícula inferior a 30 nanômetros, sendo que Da Silva (2010) atribui ao fato de que as partículas de alumina se tornam pequenas o suficiente para interferir no transporte de energia, uma vez que, para partículas deste composto, o tamanho dos fonões são de cerca de 35 nanômetros.

2.7.3 Efeito da Forma da Partícula

Nota-se que, por resultados experimentais obtidos por Xie (2002), partículas esféricas concedem ao fluido condutividade térmica inferior às alongadas. Isso se deve ao fato de que seu alongamento fornece uma maior área de contato na interface líquido-nanopartícula, deste modo, partículas esféricas possuem área superficial inferior, e, conseqüentemente, entregam ao nanofluido uma menor condutividade térmica.

2.7.4 Efeito da Temperatura

A influência da temperatura no desempenho térmico de um fluido de trabalho apresenta-se diretamente proporcional ao aumento de sua condutividade térmica. Cabe-se ressaltar que o tamanho da partícula e a fração volumétrica são fatores que contribuem com a influência da temperatura, deste modo, notou-se que tamanhos inferiores de partículas tendem a aumentar o efeito da temperatura sobre a condutividade térmica, ou seja, partículas menores, quando expostas a um gradiente de temperaturas, apresentam condutividade térmica superior às maiores.

No que diz respeito à fração volumétrica, o efeito da temperatura sobre a condutividade térmica se acentua com o aumento desta fração, onde este comportamento é oposto ao efeito isolado da fração volumétrica e nota-se um decréscimo da condutividade com o aumento da concentração. Assim sendo, acredita-se que o fato da influência da temperatura aumentar com o aumento da concentração volumétrica se dá pela influência do movimento *Browniano* (DA SILVA, 2010).

3 METODOLOGIA

No presente capítulo será discutida a metodologia utilizada para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica. Sendo apresentada a obtenção do nanofluido como fluido de trabalho, a construção dos termossifões, o aparato experimental e os procedimentos experimentais.

3.1 SÍNTESE DO NANOFLUIDO

A síntese do nanofluido de ouro, utilizado neste trabalho, obedeceu a metodologia proposta por Turkevish *et al.* (1951), onde utilizou-se 20 mL de uma solução de 1 mM de cloreto de ouro ácido trihidratado (ácido cloroáurico - $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) Vetec™ na função de agente oxidante e 2,0 mL de uma solução aquosa de 1% de citrato de sódio ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – Synth) como agente redutor. Colocou-se a solução de 20 mL de ácido cloroáurico sob agitação magnética com o intuito de promover o processo de ebulição, onde, em seguida, adicionou-se os 2 mL da solução de citrato de sódio.

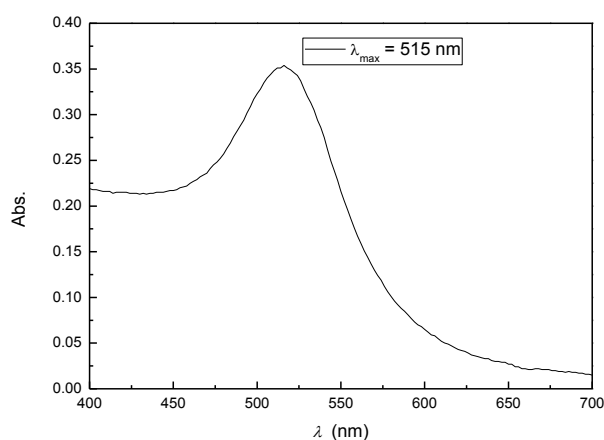
A produção das nanopartículas de ouro foi feita no Laboratório do Grupo de Fenômenos Fototérmicos em Fluidos Complexos (GFFFCx) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

3.2 CARACTERÍSTICAS DO NANOFLUIDO

As características do nanofluido, já sintetizado e homogeneizado, tais como medidas de banda de absorção, concentração de nanopartículas e tamanho médio destas foram disponibilizadas e seus valores e metodologia de obtenção estão evidenciados a seguir.

A banda de absorção das nanopartículas de ouro utilizadas neste Trabalho de Conclusão de Curso apresentam características semelhantes à literatura, referente a ressonância de plasma na faixa de 500 a 550 nm. A Figura 3 indica a banda de absorção das nanopartículas de ouro utilizadas.

Figura 3 - Espectro de absorção das nanopartículas de ouro, mostrando o máximo da absorção referente à ressonância de plasma (515 nm).

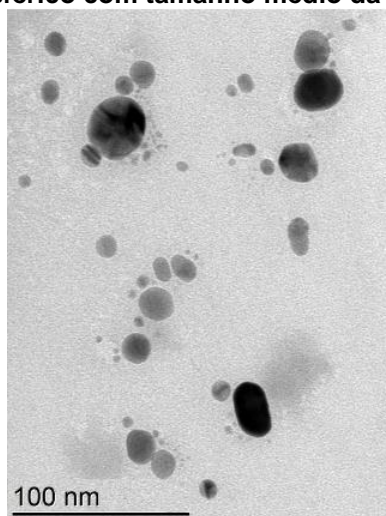


Fonte: Autoria Própria.

Com relação à concentração das partículas em solução, os dados obtidos foram na ordem de $4 \cdot 10^{12}$ nanopartículas/mL e, no período de 12 meses, não foi observada nenhuma decantação destas na solução concentrada.

O formato das partículas obtidas é preferencialmente esférico, e na ordem de 12 nm, com erro de leitura de ± 2 nm. A partir da técnica de Microscopia Eletrônica de Transmissão (TEM), realizada na Universidade Federal do Paraná (UFPR), conseguiu-se registrar o formato destas partículas, ilustradas na Figura 4 (LOPES *et al.*, 2017).

Figura 4 - Imagem obtida através da Técnica de Microscopia de Transmissão Eletrônica (TEM) das nanopartículas de ouro, mostrando que as mesmas possuem um formato preferencialmente esférico com tamanho médio da ordem de (12 ± 2) nm.



Fonte: LOPES *et al.* (2017).

3.3 OBTENÇÃO DO NANOFLUIDO COMO FLUIDO DE TRABALHO

A obtenção do nanofluido como fluido de trabalho foi realizada no Laboratório de Métodos Instrumentais, do Departamento Acadêmico de Alimentos (DAALM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), do *Câmpus* Ponta Grossa.

A metodologia utilizada para a produção do nanofluido partiu-se da diluição de uma amostra do nanofluido de ouro já estabilizado e pronto para o uso, onde se escolheram duas concentrações diferentes, sendo 20% e 10%, do volume total preenchido com o nanofluido, e o restante com água destilada.

Durante o procedimento, fez-se o uso de um béquer de laboratório, devidamente limpo e livre de impurezas, contendo água destilada, assim como dois tubos de ensaio, nas mesmas condições, sendo o primeiro preenchido com nanofluido concentrado, e o outro para a mistura. Inicialmente produziram-se 24 mL de nanofluido diluído, com concentração de 20%, o qual fora composto por 4,8 mL de nanofluido concentrado, e 19,2 mL de água destilada. Para a captação dos fluidos, foi utilizada uma micropipeta de volume fixo, a qual era limitada a obter no máximo um milímetro, e repetia-se o procedimento até a quantidade necessária de água destilada e nanofluido. Para a concentração de 10%, o procedimento foi semelhante ao anterior.

3.4 CONSTRUÇÃO DOS TERMOSSIFÕES

A construção dos termossifões foi realizado no Laboratório de Controle Térmico (LabCT) vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), do *Câmpus* Ponta Grossa.

3.4.1 Característica dos Termossifões

Os termossifões foram produzidos a partir de tubos de cobre ASTM B75 (invólucros) de diâmetro externo de 9,45 mm e interno de 7,75 mm, seccionados com 200 mm de comprimento a partir da utilização de um corta-tubo. Também foram utilizadas duas tampas de cobre para cada termossifão, usinadas a partir de uma

barra maciça de cobre com mesmo diâmetro externo do invólucro, onde uma delas seria furada com diâmetro de 1 mm, além de tubos capilares de cobre, com diâmetro de 1 mm e comprimento de 40 mm. Os componentes estão indicados pela Figura 5.

Figura 5 - Componentes utilizados para a montagem do termossifão: um invólucro, duas tampas e um tubo capilar.



Fonte: Autoria Própria.

O invólucro do termossifão foi subdividido em três partes, a primeira sendo o evaporador, posteriormente a região adiabática e o condensador, com dimensões de 80 mm, 20 mm e 100 mm, respectivamente. Os fluidos de trabalho utilizados foram água deionizada e nanofluido de ouro com concentrações diferentes (10% e 20%), com razão de preenchimento de 40% do volume total do evaporador. Na Tabela 4 são apresentadas as principais características dos termossifões.

Tabela 4 - Características dos termossifões estudados.

Características dos termossifões	
Diâmetro Externo [mm]	9,45
Diâmetro Interno [mm]	7,75
Comprimento do evaporador [mm]	80
Comprimento da região adiabática [mm]	20
Comprimento do condensador [mm]	100
Fluido de Trabalho	Água Deionizada
	Nanofluido de ouro (10%)
	Nanofluido de ouro (20%)
Razão de Preenchimento [%]	40
Volume de Fluido de Trabalho [mL]	1,5

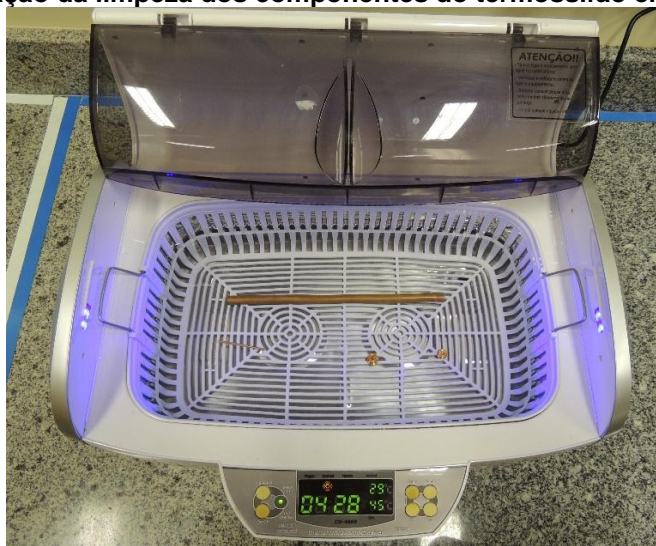
Fonte: Autoria própria.

3.4.2 Limpeza dos Termossifões

Krambeck (2016) afirma que a limpeza dos termossifões é necessária para garantir a molhabilidade do fluido de trabalho, além de aprimorar a qualidade do vácuo e eliminar impurezas presentes nos componentes.

Inicialmente cada componente passou por um procedimento de limpeza em acetona, os quais foram lavados individualmente e, para garantir uma remoção completa das impurezas presentes nos componentes, mergulharam-se os mesmos em acetona, onde foram submetidos à um banho ultrassônico *Kondentech™*, como indicado pela Figura 6, por cerca de 5 (cinco) minutos, onde repetiu-se o procedimento por três vezes, totalizando 15 (quinze) minutos de banho. Ao fim do processo, os componentes estão aptos à montagem.

Figura 6 - Demonstração da limpeza dos componentes do termossifão em banho ultrassônico.



Fonte: A autoria própria.

3.4.3 Montagem dos Termossifões

Após o procedimento limpeza no banho ultrassônico, os componentes foram montados com a utilização da brasagem por estanho. Desta forma, foi utilizado um ferro de soldar *Hikari™ Power 300*, o qual fornecia calor à tampa de cobre, e, em seguida, adicionava-se liga de estanho na função de material de adição para realizar a brasagem. Assim como a união das tampas ao invólucro, o procedimento foi semelhante para a brasagem do capilar à tampa, conforme indicado na Figura 7.

Figura 7 - Demonstração do procedimento de brasagem realizado para a união dos componentes do termossifão.



Fonte: Autoria própria.

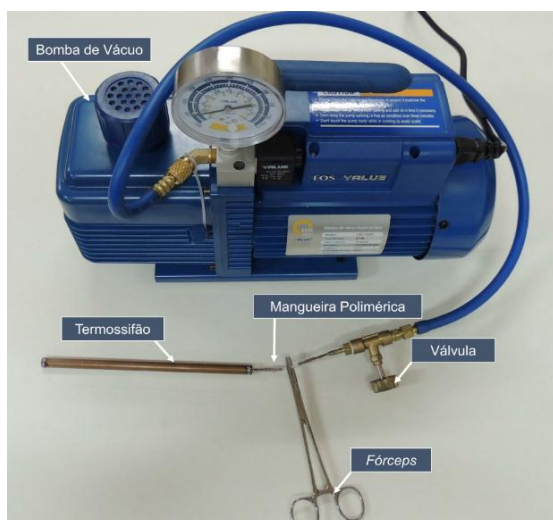
3.4.4 Teste de Estanqueidade

Logo após sua montagem, foi verificado se a brasagem estaria realizada de forma adequada, ou seja, se não há a entrada de ar por algum poro, fato esse que inviabilizaria o processo subsequente, a evacuação dos termossifões. Sendo assim, o conjunto foi submetido a um teste de estanqueidade, onde é acoplado ao capilar do termossifão uma mangueira de polímero e, a ela conectada uma bomba de deslocamento manual. Após isso, os termossifões foram mergulhados em um recipiente contendo água. Por meio do bombeamento manual, foi adicionada pressão no interior dos termossifões, e, caso algum termossifão apresente qualquer tipo de falha na brasagem, fato que pode ser facilmente notado pela presença de bolhas de ar no recipiente com água, o procedimento de montagem deveria ser refeito. Como não houve presença de bolhas no sistema, os termossifões estão aptos à evacuação.

3.4.5 Processo de Evacuação

Com a brasagem realizada e sem falhas operacionais, os termossifões estão prontos para evacuação, procedimento que antecede ao preenchimento. Para a evacuação dos termossifões foi utilizada uma bomba de vácuo *EOS Value™ i260SV*, como apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Demonstração do procedimento de evacuação do termossifão.



Fonte: Autoria própria.

Assim, foi conectado ao capilar de cada termossifão uma mangueira polimérica, semelhante à utilizada no teste de estanqueidade, e acoplou o dispositivo à máquina de vácuo. Essa união se deu através da interligação da mangueira a uma válvula de controle de fluxo, e uma mangueira flexível de borracha. Para garantir a vedação, uma graxa de alto vácuo *Dow Corning™* foi utilizada nas conexões. Após acoplamento, a bomba de vácuo é acionada e o processo é feito por, no mínimo, 8 (oito) horas.

Com a realização do vácuo, a pressão manométrica, indicada no vacuômetro da bomba, deve ser de -90 kPa (NISHIDA, 2016). Por fim, com a utilização de um pinça hemostática reta, interrompeu-se o procedimento de vácuo e desconectou-se o termossifão da bomba. Desta forma, o mesmo está apto ao preenchimento do fluido de trabalho.

3.4.6 Preenchimento dos Termossifões

O preenchimento dos termossifões foi realizado a partir de uma bancada de preenchimento, a mesma composta de um suporte universal com garra, uma bureta graduada *Global Glass™*, a mesma possuindo escala de 0,1 mL e capacidade de até 25 mL, uma seringa, uma mangueira polimérica e uma pinça hemostática reta. A montagem do conjunto é indicada pela Figura 9.

Figura 9 - Demonstração do procedimento de preenchimento do termossifão.



Fonte: Autoria própria.

Inicialmente preencheu-se a bureta com o fluido de trabalho, onde foram colocados cerca de 25 mL do mesmo. Para a água deionizada, despejou-se a mesma de um *Becker* até a bureta. Já para o nanofluido de ouro, essa abordagem pode gerar bolhas de ar no interior do fluido, o que pode prejudicar o funcionamento dos termossifões. Desta forma, a fim de evitar sua formação, a bureta foi preenchida com o auxílio de uma seringa, e adicionando fluido aos poucos até a 25 mL.

Com o auxílio de uma seringa, adiciona-se o fluido de trabalho à mangueira polimérica que está acoplada aos termossifões, vindo da evacuação. Esta metodologia é feita para evitar a presença de bolhas no interior do termossifão. Feito isso, foi acoplada a mangueira polimérica à bureta e abriu-se a válvula cuidadosamente, a fim de evitar a formação de bolhas de ar no interior do fluido de trabalho, e controla-se a entrada do fluido no interior do termossifão pela abertura da pinça hemostática. O conteúdo de fluido de trabalho desejado adicionado aos termossifões foi de 1,5 mL, correspondente a 40% do volume total do evaporador.

Após o preenchimento, foi necessário conformar o capilar dos termossifões com o auxílio de um alicate de pressão, a fim de se evitar a entrada de ar no interior dos termossifões e, conseqüente perda de vácuo. E, finalmente, é adicionada uma porção de liga de estanho ao capilar – Figura 10.

Figura 10 - Demonstração do procedimento de selagem do termossifão.



Fonte: Autoria própria.

3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção, será apresentado o aparato experimental bem como o procedimento experimental realizado para a obtenção dos resultados.

3.5.1 Fixação dos Termopares

Inicialmente, percorreu-se certa quantidade de fita termossensível *Kapton*TM por todo o invólucro dos termossifões, e posterior colagem dos termopares. Para avaliação do comportamento térmico dos termossifões, foram fixados 9 (nove) termopares *Omega*TM do tipo K pela utilização da fita termossensível *Kapton*TM, dispostos ao longo de todo o comprimento do invólucro, sendo 3 (três) termopares presentes no evaporador, 1 (um) na região adiabática, 4 (quatro) no condensador e 1 (um) para a leitura da temperatura ambiente.

3.5.2 Resistência Elétrica

A adição de energia no sistema é feita a partir da utilização da passagem de corrente elétrica em uma diferença de potencial, tal energia promove, por Efeito *Joule*, o aquecimento do evaporador. Para isso, utilizou-se um resistor elétrico na forma de uma fita de composição de liga de níquel-cromo, disposta igualmente por toda superfície do evaporador, e à suas extremidades são acopladas conectores elétricos, que serão responsáveis por promover a passagem de corrente da fonte de

alimentação para o resistor. A fixação do resistor é feita pela utilização da fita termossensível *Kapton*TM.

3.5.3 Isolamento do Evaporador

Com o intuito de isolar termicamente a região do evaporador, para que a energia fornecida ao sistema não seja retirada pelo meio externo, envolveu-se o evaporador com uma camada de polietileno preenchido com um isolante térmico aeronáutico, este último estará em contato com a parede do invólucro.

3.5.4 Isolamento da Região Adiabática

Para a realização do isolamento da região adiabática, utilizou-se uma fita de fibra de vidro durante toda a extensão da seção, desta forma, foi evitado a troca de calor entre o invólucro do termossifão e o suporte sobre o qual a estrutura será montada.

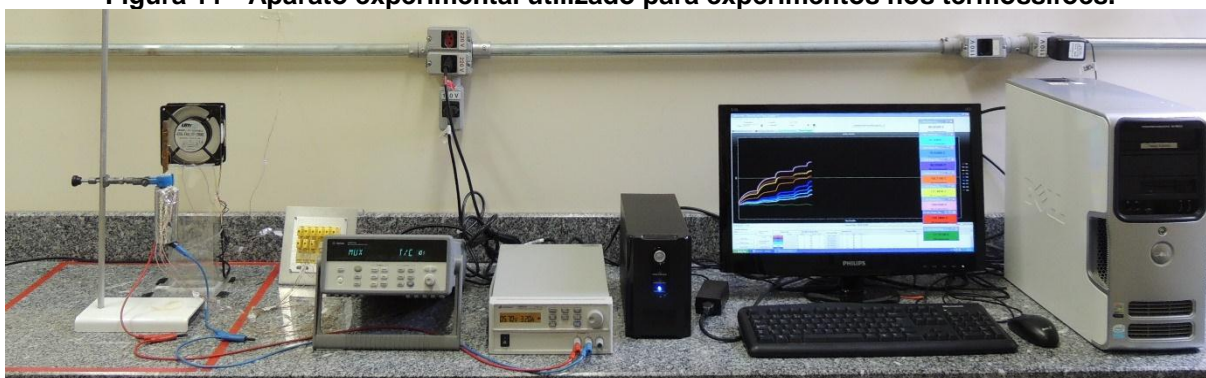
3.5.5 Resfriamento do Condensador

Para retirada do calor do sistema e promover a condensação do fluido de trabalho, opta-se pela convecção forçada de ar atmosférico. Desta forma, posiciona-se um ventilador *Ultrar*TM na região com condensador.

3.5.6 Aparato Experimental

O aparato experimental utilizado no presente Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica é indicado na Figura 11.

Figura 11 - Aparato experimental utilizado para experimentos nos termossifões.



Fonte: Autoria Própria.

Este aparato é composto por um sistema de aquisição de dados *Agilent*TM DAQ-34970A contendo um multiplexador *Agilent*TM 34901A com 20 canais, um ventilador *Ultrar*TM DF1203HBL2, uma fonte de alimentação *Agilent*TM U8002A, um computador *Dell*TM, um *nobreak* NHSTM 1200 VA e um suporte universal com garra.

3.5.7 Procedimento Experimental

Inicialmente fixou-se o termossifão na garra do suporte universal pela região adiabática, posicionando-o com a inclinação de 90° e ajustando o ventilador para que o mesmo estivesse na região do condensador. O ventilador forneceu ar a uma velocidade de 5 m/s, sendo que esta foi controlada através de um anemômetro portátil *Itan*TM.

Para a realização dos testes experimentais, é fundamental estabelecer uma faixa de temperatura estável para o meio externo, desta forma, utilizou-se um sistema de ar condicionado *Rhemm*TM, ajustado a uma temperatura de 20 °C.

Feito isso, a partir da fonte de alimentação, selecionou-se uma carga térmica inicial de 5W, e foi-se aumentando a mesma de 5 em 5W, até atingir a temperatura de 100°C. Tal temperatura é limitante, pois, ao atingi-la, o nanofluido utilizado como fluido de trabalho pode apresentar perda de propriedades, o que pode prejudicar o seu comportamento térmico. Para a água deionizada, a temperatura máxima de 160°C foi estabelecida para que não houvesse perdas nos materiais utilizados na montagem do termossifão. Cada carga térmica é mantida por 15 (quinze) minutos, para que se estabeleça o regime quase permanente durante o funcionamento dos termossifões.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão discutidos os resultados experimentais obtidos na análise do desempenho térmico de termossifões com razão de preenchimento de 40%, em duas diferentes inclinações, sendo as posições vertical e inclinada em 45°, e com fluidos de trabalho diferentes, um termossifão preenchido com água, e outros dois termossifões com nanofluido de ouro em concentrações de 10% e 20%.

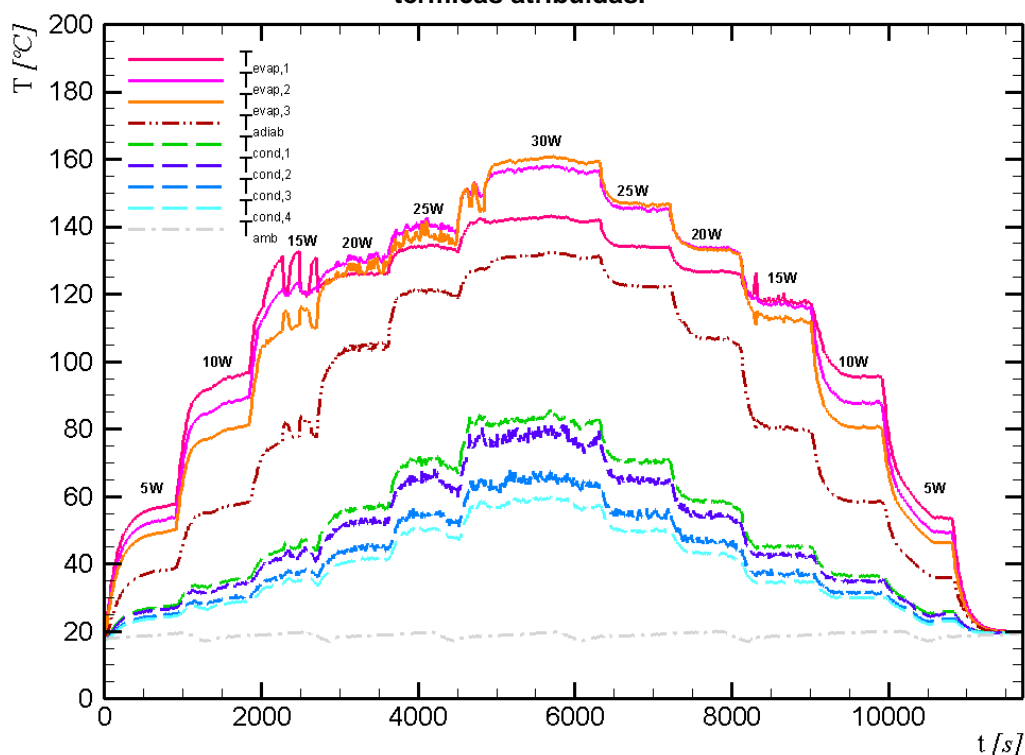
4.1 TERMOSSIFÃO CONTENDO ÁGUA

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os resultados de desempenho térmico de um termossifão operando com água como fluido de trabalho, com razão de preenchimento de 40%, em posições vertical e inclinado 45°.

4.1.1 Posição Vertical (90°)

O Gráfico 2 apresenta o comportamento das temperaturas ao longo do termossifão em função do tempo para as diferentes cargas térmicas atribuídas.

Gráfico 2 - Comportamento das temperaturas em função do tempo para as diferentes cargas térmicas atribuídas.



Fonte: Autoria Própria.

Para o termossifão, o regime quase permanente estabeleceu-se por volta de 500s após a aplicação da primeira carga térmica. Com a potência de 30W, o regime quase permanente foi atingido com a temperatura de operação de 130,92°C. Para a carga térmica subsequente (35W), a temperatura crítica de 160°C seria atingida, impossibilitando a utilização da mesma. Em seguida, reduziu-se a potência para 25W, e assim sucessivamente até não haver aplicação de carga térmica sobre o termossifão.

As temperaturas registradas ao longo do comprimento do termossifão, quando o mesmo se comportava em regime quase permanente à aplicação de cargas térmicas crescentes, estão indicadas pela Tabela 5.

Tabela 5- Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão, ao longo de seu comprimento, para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem crescente.

Potência [W]	$T_{evap,1}$ [°C]	$T_{evap,2}$ [°C]	$T_{evap,3}$ [°C]	T_{adiab} [°C]	$T_{cond,1}$ [°C]	$T_{cond,2}$ [°C]	$T_{cond,3}$ [°C]	$T_{cond,4}$ [°C]	T_{amb} [°C]
5	57,10	53,13	49,48	38,20	27,37	26,59	24,90	24,19	19,03
10	95,81	88,48	80,44	57,69	35,39	33,85	30,06	28,69	18,60
15	125,84	121,43	112,87	80,36	45,67	42,94	37,54	35,24	19,43
20	126,11	130,74	128,12	104,70	56,78	52,70	44,95	41,58	18,90
25	133,64	139,69	136,63	120,35	69,19	63,52	53,60	48,71	18,05
30	141,66	156,23	159,12	130,92	81,75	75,61	63,34	56,76	17,84

Fonte: Autoria Própria

Para as cargas térmicas aplicadas em ordem decrescente, as temperaturas ao longo do comprimento do termossifão, para o regime quase permanente estão indicados pela Tabela 6.

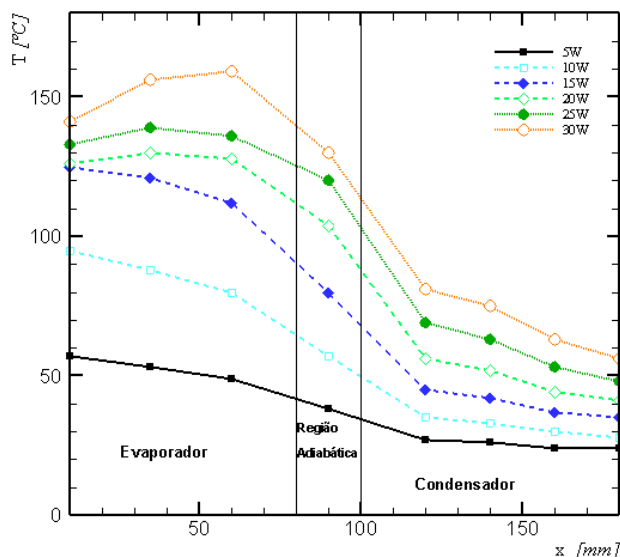
Tabela 6 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão, ao longo de seu comprimento, para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem decrescente.

Potência [W]	$T_{evap,1}$ [°C]	$T_{evap,2}$ [°C]	$T_{evap,3}$ [°C]	T_{adiab} [°C]	$T_{cond,1}$ [°C]	$T_{cond,2}$ [°C]	$T_{cond,3}$ [°C]	$T_{cond,4}$ [°C]	T_{amb} [°C]
30	141,66	156,23	159,12	130,92	81,75	75,61	63,34	56,76	17,84
25	133,91	145,06	146,49	122,19	70,30	64,64	54,64	49,92	19,15
20	126,50	133,24	132,73	106,16	57,67	53,56	45,75	42,17	19,00
15	117,59	116,29	112,20	79,93	45,14	42,48	36,98	34,70	18,78
10	95,54	87,72	80,51	58,45	36,49	34,93	31,39	29,96	19,78
5	53,80	49,59	46,52	36,09	25,70	24,94	23,37	22,66	18,03

Fonte: Autoria Própria.

O Gráfico 3 mostra a distribuição das temperaturas ao longo do termossifão, quando o regime quase permanente foi atingido, em função do comprimento do termossifão quando a carga térmica submetida à ele foi de ordem crescente.

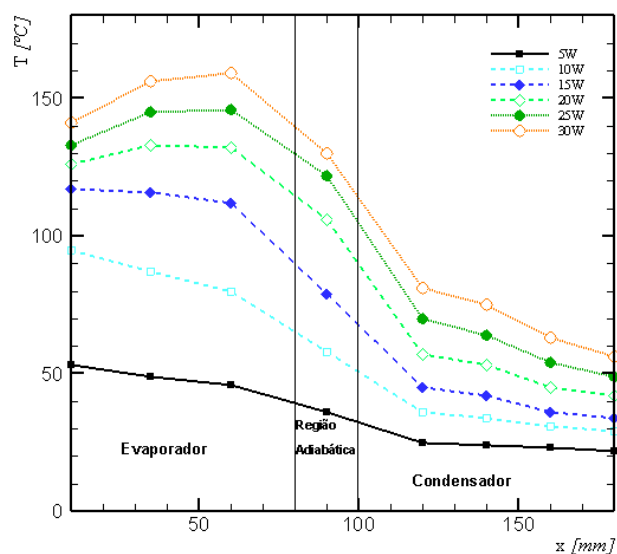
Gráfico 3 - Distribuição das temperaturas ao longo do termossifão para cargas térmicas crescente.



Fonte: Autoria Própria.

No Gráfico 4 apresenta-se esta distribuição das temperaturas quando o regime quase permanente foi atingido, está indicado para cargas térmicas decrescentes.

Gráfico 4 - Distribuição das temperaturas ao longo do termossifão para os diferentes cargas térmicas decrescentes.



Fonte: Autoria Própria.

A temperatura de operação (temperatura da região adiabática) e a resistência térmica do termossifão operando com água como fluido de trabalho e na posição vertical, para cargas térmicas crescentes, estão indicadas pela Tabela 7.

Tabela 7 - Temperatura de operação e resistência térmica do termossifão, operando com água, para as diferentes cargas térmicas aplicadas em ordem crescente.

Potência [W]	Temperatura de Operação [°C]	Resistência Térmica [°C/W]
5	38,20	5,48±0,59
10	57,69	5,62±0,32
15	80,36	5,31±0,22
20	104,70	3,96±0,16
25	120,35	3,11±0,13
30	130,92	3,19±0,11

Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 8, apresenta tais informações quando a carga térmica aplicada sobre o termossifão foi de ordem decrescente.

Tabela 8 – Temperatura de operação e resistência térmica do termossifão, operando com água, para as diferentes cargas térmicas aplicadas em ordem decrescente.

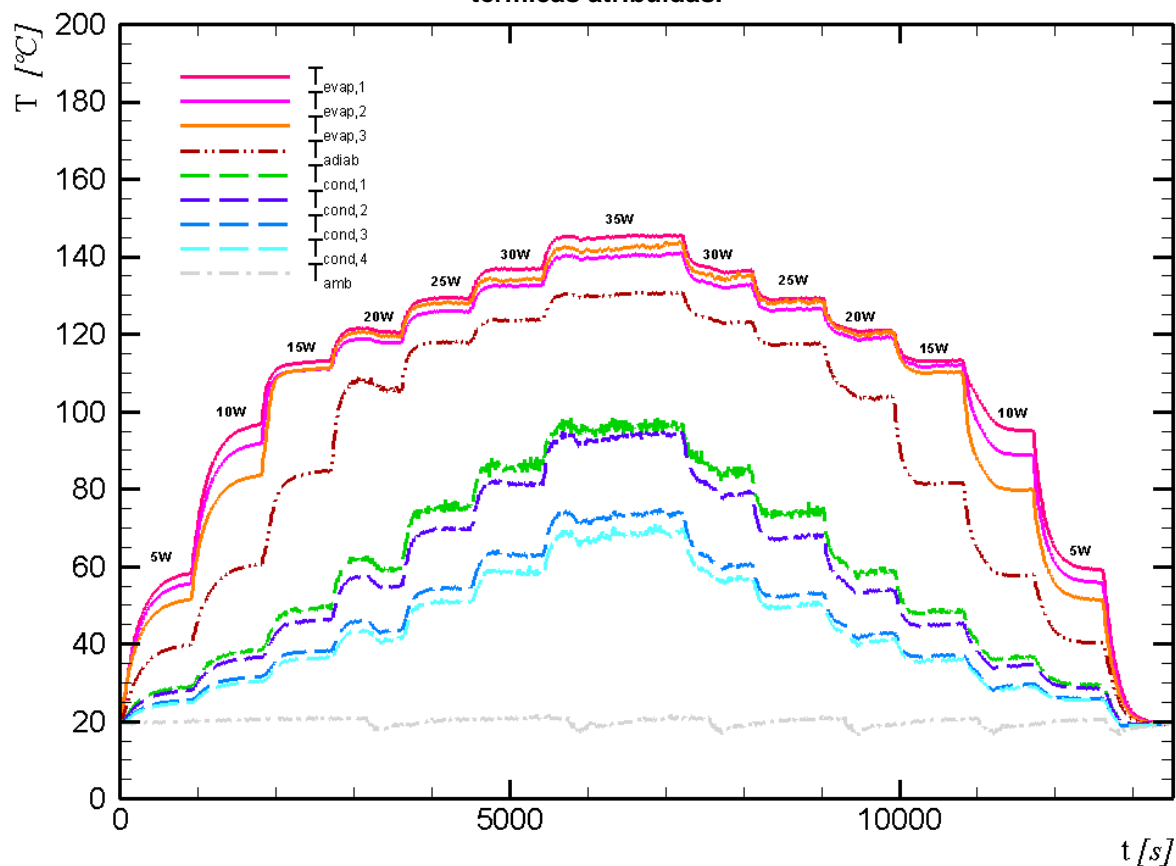
Potência [W]	Temperatura de Operação [°C]	Resistência Térmica [°C/W]
30	130,92	2,77±0,11
25	122,19	3,27±0,13
20	106,16	4,05±0,16
15	79,93	5,02±0,22
10	58,45	5,46±0,32
5	36,09	5,11±0,58

Fonte: Autoria Própria.

4.1.2 Posição Inclinada em 45°

O Gráfico 5 apresenta o comportamento das temperaturas ao longo do termossifão contendo água como fluido de trabalho para as diferentes cargas térmicas atribuídas.

Gráfico 5 - Distribuição das temperaturas ao longo do termossifão para as diferentes cargas térmicas atribuídas.



Fonte: Autoria Própria.

Para o termossifão, o regime quase permanente estabeleceu-se por volta de 600s após a aplicação da primeira carga térmica. Com a potência de 35W, o regime quase permanente foi atingido com a temperatura de operação de 130,65°C. A carga seguinte não pode ser atingida pelo fato do limite de potência qual poderia ser aplicada sobre a fita de níquel cromo, era inferior a 40W. Em seguida, reduziu-se a carga térmica para 30W, e assim conseqüentemente, até não haver aplicação de carga térmica sobre o termossifão.

A Tabela 9, apresenta a temperatura que o regime quase permanente foi atingido, para as diferentes cargas térmicas atribuídas, em ordem crescente, de 5W a 35W.

Tabela 9 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão, para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem crescente.

Potência [W]	$T_{evap,1}$ [°C]	$T_{evap,2}$ [°C]	$T_{evap,3}$ [°C]	T_{adiab} [°C]	$T_{cond,1}$ [°C]	$T_{cond,2}$ [°C]	$T_{cond,3}$ [°C]	$T_{cond,4}$ [°C]	T_{amb} [°C]
5	57,43	54,88	50,83	39,35	28,69	27,78	25,33	24,75	19,91
10	96,11	91,24	83,02	60,17	38,26	36,35	31,36	30,16	20,51
15	113,00	110,98	111,11	84,48	49,32	46,19	38,19	36,40	20,83
20	120,55	117,90	119,55	105,64	59,48	54,85	43,35	41,01	18,53
25	129,38	125,96	128,07	117,88	75,35	69,77	54,41	50,81	20,53
30	136,87	132,54	134,20	123,68	86,27	81,31	62,94	58,53	20,92
35	145,42	140,68	143,21	130,65	96,42	94,27	73,79	68,80	20,69

Fonte: Autoria Própria.

Assim como para as cargas crescentes, a Tabela 10 apresenta, nas diferentes cargas térmicas atribuídas decrescentemente, as leituras de temperatura nos termopares quando o regime quase permanente foi atingido.

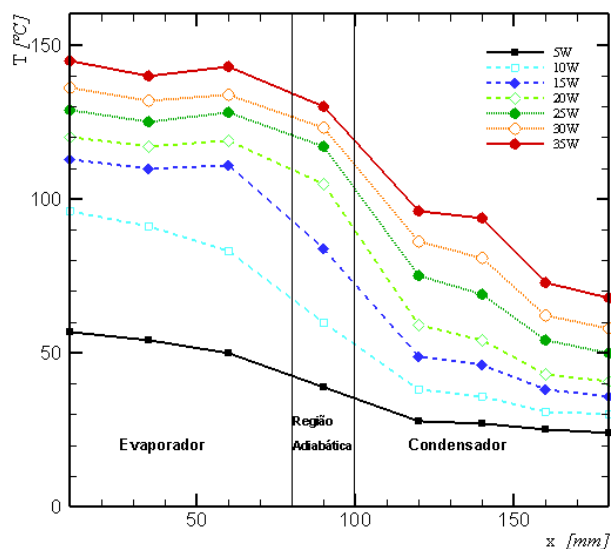
Tabela 10 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão, para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem decrescente.

Potência [W]	$T_{evap,1}$ [°C]	$T_{evap,2}$ [°C]	$T_{evap,3}$ [°C]	T_{adiab} [°C]	$T_{cond,1}$ [°C]	$T_{cond,2}$ [°C]	$T_{cond,3}$ [°C]	$T_{cond,4}$ [°C]	T_{amb} [°C]
35	145,42	140,68	143,21	130,65	96,42	94,27	73,79	68,80	20,69
30	136,25	132,53	134,91	123,08	84,65	78,80	60,34	56,82	18,88
25	129,27	126,51	128,45	117,55	74,13	67,94	52,96	50,30	20,61
20	120,93	119,03	120,31	103,64	58,85	53,90	42,64	40,90	18,91
15	113,23	112,01	110,26	81,62	48,44	45,13	37,13	35,87	20,53
10	95,24	88,83	79,82	57,77	36,63	34,54	29,44	28,76	18,99
5	59,39	56,04	51,55	40,34	29,60	28,60	25,98	25,58	20,43

Fonte: Autoria Própria.

O Gráfico 6 apresenta o comportamento das temperaturas quando o regime quase permanente foi atingido, ao longo de todo o comprimento do termossifão, sendo este exposto à cargas térmicas crescentes.

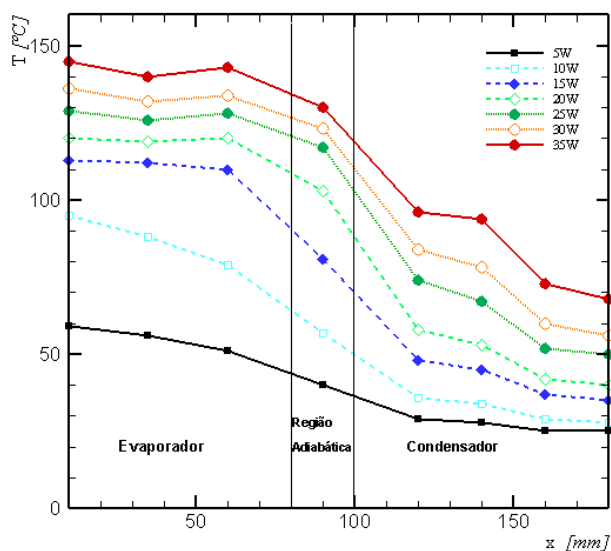
Gráfico 6 - Distribuição das temperaturas do termossifão em função de seu comprimento, para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem crescente.



Fonte: Autoria Própria.

O Gráfico 7 apresenta tais temperaturas para cargas térmicas decrescentes.

Gráfico 7 - Distribuição das temperaturas do termossifão em função de seu comprimento, para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem decrescente.



Fonte: Autoria Própria.

A partir da análise do comportamento das temperaturas, consegue-se perceber um comportamento quase isotérmico do evaporador a partir da carga térmica de 15W, fato esse que não se verifica no condensador, onde há um gradiente de temperaturas maior.

Para as potências de 5W e 10W, onde há um gradiente de temperaturas maior na região do evaporador, surge a hipótese de que tal comportamento se verifica pela baixa quantidade de vapor produzido, e, conseqüentemente, pelo baixo retorno de líquido condensado retornando ao evaporador. Deste modo, a porção de fluido no evaporador está sendo aquecida em um maior teor do que o vapor, dado pelo sua maior condutividade térmica.

A Tabela 11 apresenta a temperatura de operação e a resistência térmica do termossifão exposto à cargas térmicas crescentes.

Tabela 11 - Temperatura de operação e da resistência térmica do termossifão, com água como fluido de trabalho, operando com cargas térmicas aplicadas em ordem crescente.

Potência [W]	Temperatura de Operação [°C]	Resistência Térmica [°C/W]
5	39,35	5,52±0,59
10	60,17	5,59±0,32
15	84,48	4,61±0,22
20	105,64	3,48±0,16
25	117,88	2,61±0,12
30	123,68	2,08±0,10
35	130,65	1,70±0,09

Fonte: Autoria Própria.

A análise também foi realizada com as cargas térmicas aplicadas em ordem decrescente, e os resultados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Temperatura de operação e da resistência térmica do termossifão, com água como fluido de trabalho, operando com cargas térmicas aplicadas em ordem decrescente.

Potência [W]	Temperatura de Operação [°C]	Resistência Térmica [°C/W]
35	130,65	1,70±0,09
30	123,08	2,14±0,10
25	117,55	2,67±0,13
20	103,64	3,53±0,16
15	81,62	4,65±0,22
10	57,77	5,52±0,32
5	40,34	5,60±0,59

Fonte: Autoria Própria.

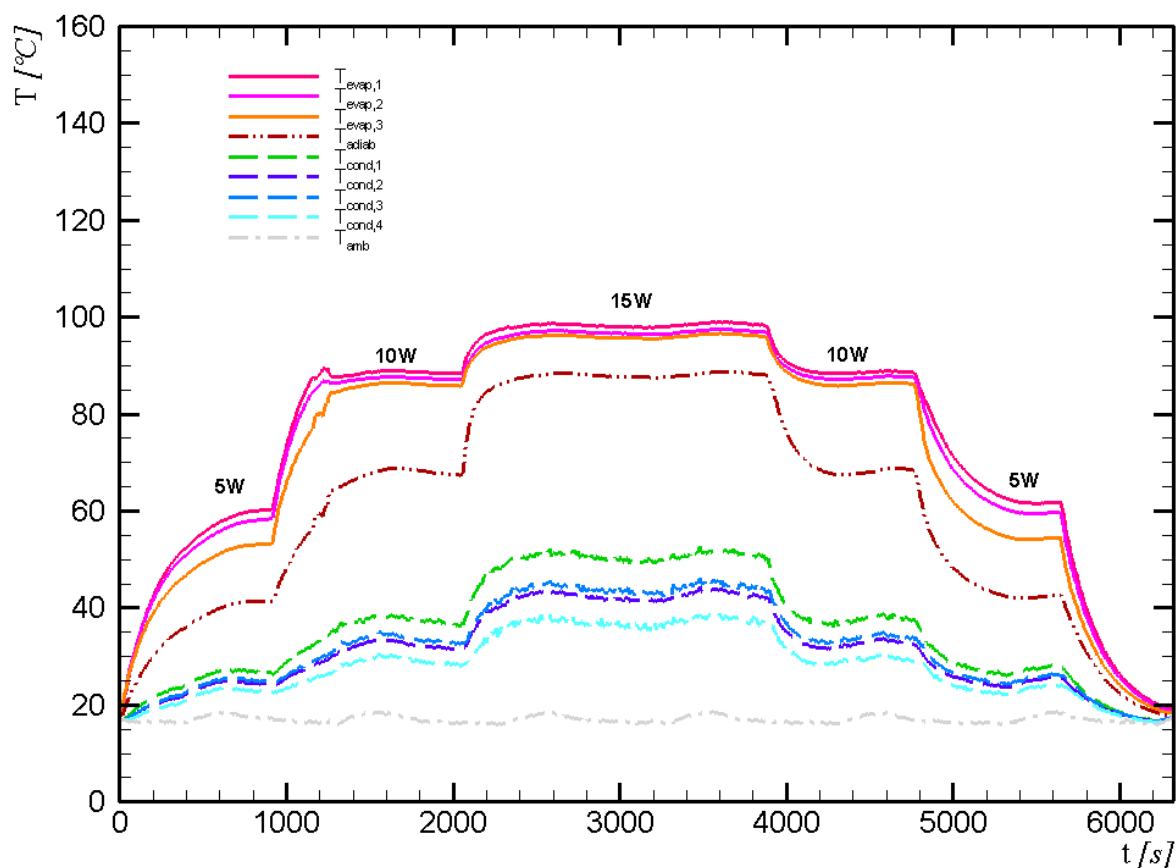
4.2 TERMOSSIFÃO COM NANOFLUIDO 10%

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos a partir dos testes experimentais realizados em um termossifão operando com nanofluido como fluido de trabalho, na concentração de 10% em água, e com configurações diferentes.

4.2.1 Posição Vertical (90°)

O Gráfico 8 apresenta o comportamento das temperaturas ao longo do termossifão em função do tempo para as diferentes cargas térmicas atribuídas.

Gráfico 8 - Distribuição das temperaturas ao longo do termossifão em função do tempo para as diferentes cargas térmicas atribuídas.



Fonte: Autoria Própria.

Para o termossifão, o regime quase permanente se estabeleceu por volta de 600 segundos após a aplicação da primeira carga térmica. Com a potência de 15W, o regime quase permanente foi atingido à temperatura de 97,45°C. Para a carga térmica subsequente, de 20W, a temperatura crítica para operação do nanofluido, 100°C, seria atingida, inviabilizando sua utilização. Após 30 minutos, a potência foi reduzida para 10W, e assim sucessivamente até a não aplicação de carga térmica sobre o termossifão.

A Tabela 13 apresenta os valores de temperatura obtidos ao longo do termossifão, quando o regime quase permanente foi obtido, para as diferentes cargas térmicas aplicados em ordem crescente.

Tabela 13 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem crescente.

Potência [W]	$T_{evap,1}$ [°C]	$T_{evap,2}$ [°C]	$T_{evap,3}$ [°C]	T_{adiab} [°C]	$T_{cond,1}$ [°C]	$T_{cond,2}$ [°C]	$T_{cond,3}$ [°C]	$T_{cond,4}$ [°C]	T_{amb} [°C]
5	59,52	57,60	52,67	41,12	26,99	24,66	25,23	23,10	17,74
10	88,55	87,31	86,01	67,93	37,08	31,88	33,12	28,70	16,56
15	98,71	97,26	96,37	88,51	51,20	42,93	44,45	37,65	17,25

Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 14 indica as temperaturas obtidas, em regime quase permanente, nas diferentes cargas térmicas atribuídas ao termossifão carregado com nanofluido com 10%, para cargas térmicas decrescentes.

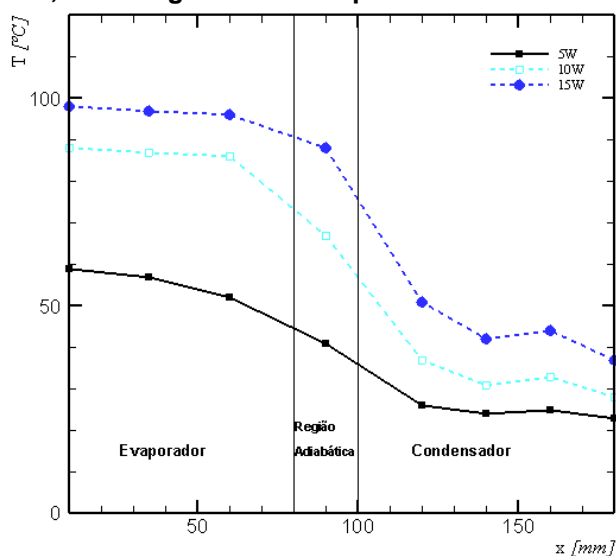
Tabela 14 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem decrescente.

Potência [W]	$T_{evap,1}$ [°C]	$T_{evap,2}$ [°C]	$T_{evap,3}$ [°C]	T_{adiab} [°C]	$T_{cond,1}$ [°C]	$T_{cond,2}$ [°C]	$T_{cond,3}$ [°C]	$T_{cond,4}$ [°C]	T_{amb} [°C]
15	98,71	97,26	96,37	88,51	51,20	42,93	44,45	37,65	17,25
10	88,78	87,70	86,38	68,50	38,03	33,03	34,19	29,71	17,83
5	61,80	59,66	54,36	42,29	27,43	25,06	25,61	23,47	17,64

Fonte: Autoria Própria.

O Gráfico 9 apresenta as temperaturas onde o regime quase permanente foi atingido no termossifão, em função de seu comprimento, para as cargas térmicas atribuídas em ordem crescente.

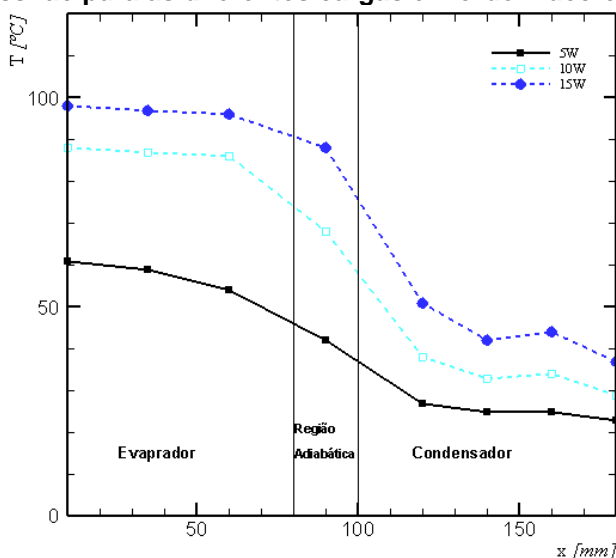
Gráfico 9 - Temperatura de regime quase permanente em função do comprimento do termossifão, com cargas térmicas aplicadas em ordem crescente.



Fonte: Autoria Própria.

Para as cargas aplicadas em ordem decrescente, o Gráfico 10 mostra as temperaturas de regime quase permanente em função do comprimento do termossifão.

Gráfico 10 - Temperatura de regime quase permanente em função do comprimento do termossifão para as diferentes cargas em ordem decrescente.



Fonte: Autoria Própria.

Não foi possível perceber um gradiente de temperaturas considerável tanto na região do evaporador, quanto na região do condensador durante a operação do termossifão. Sendo assim, pode-se indicar que, com exceção da carga térmica de 5W, as regiões do evaporador e do condensador se comportaram de maneira quase isotérmica.

A Tabela 15 indica a temperatura de operação do termossifão, assim como a resistência térmica para o regime quase permanente do termossifão para cargas térmicas crescentes.

Tabela 15 – Temperatura de operação e resistência térmica do termossifão, com nanofluido em concentração de 10%, para cargas térmicas atribuídas em ordem crescente.

Potência [W]	Temperatura de Operação [°C]	Resistência Térmica [°C/W]
5	41,12	6,32±0,60
10	67,93	5,46±0,32
15	88,51	3,55±0,20

Fonte: Autoria própria.

A temperatura de operação e a resistência térmica, para o regime quase permanente do termossifão para cargas térmicas decrescentes estão indicados na Tabela 16.

Tabela 16 – Temperatura de operação e resistência térmica do termossifão, com nanofluido em concentração de 10%, para cargas térmicas decrescentes.

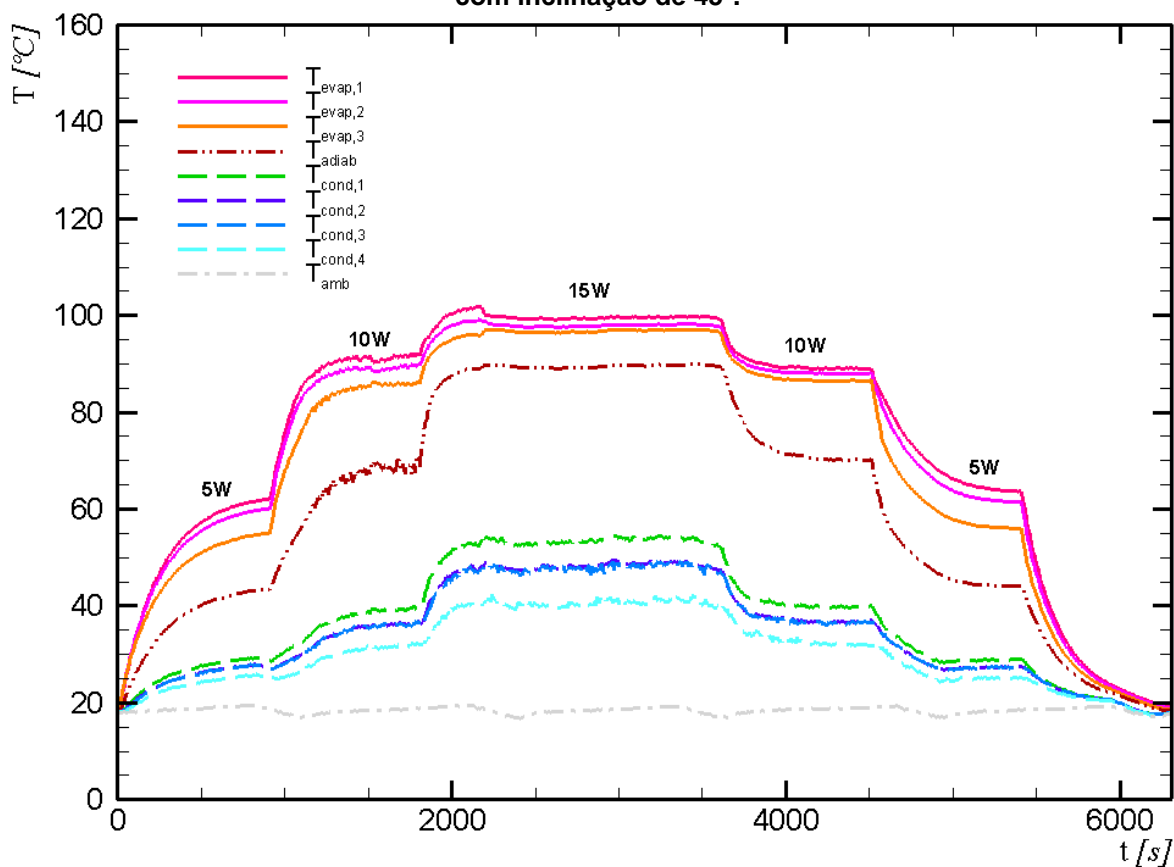
Potência [W]	Temperatura de Operação [°C]	Resistência Térmica [°C/W]
15	88,51	3,55±0,20
10	68,50	5,38±0,32
5	42,29	6,62±0,60

Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Posição Inclinada em 45°

O Gráfico 11 mostra o comportamento das temperaturas obtidas, nos testes experimentais, em função do comprimento do termossifão, para as diferentes cargas térmicas atribuídas ao dispositivo passivo de transferência de calor com nanofluido 10% em inclinação de 45°.

Gráfico 11 - Comportamento das temperaturas ao longo do termossifão, com nanofluido 10%, com inclinação de 45°.



Fonte: Autoria Própria.

O regime quase permanente foi estabelecido por volta de 500s após a aplicação da primeira carga térmica. Na potência de 15W, o regime quase permanente foi estabelecido à uma temperatura máxima de 99,67°C, impossibilitando a utilização da carga térmica de 20W, uma vez que a temperatura limite para o funcionamento correto do fluido de trabalho era de 100°C. Após 30 minutos na potência máxima, a carga térmica foi reduzida à 10W, e assim sucessivamente até a ausência completa de aquecimento sobre o dispositivo.

A Tabela 17 apresenta os valores sob os quais foram registradas as temperaturas, em regime quase permanente, em toda a extensão do termossifão, para os cargas térmicas aplicados em ordem crescente.

Tabela 17 - Temperaturas registradas em regime quase permanente ao longo do termossifão, com nanofluido a 10% de concentração, operando em cargas crescentes.

Potência [W]	$T_{evap,1}$ [°C]	$T_{evap,2}$ [°C]	$T_{evap,3}$ [°C]	T_{adiab} [°C]	$T_{cond,1}$ [°C]	$T_{cond,2}$ [°C]	$T_{cond,3}$ [°C]	$T_{cond,4}$ [°C]	T_{amb} [°C]
5	61,03	59,08	54,10	42,74	28,88	27,45	27,38	25,34	19,26
10	91,28	89,18	85,85	68,83	39,24	36,23	36,06	31,64	18,63
15	99,67	98,11	96,98	89,78	53,61	48,52	48,09	40,82	18,31

Fonte: Autoria Própria.

Em cargas decrescentes, os valores de temperatura em regime quase permanente, estão ilustrados pela Tabela 18.

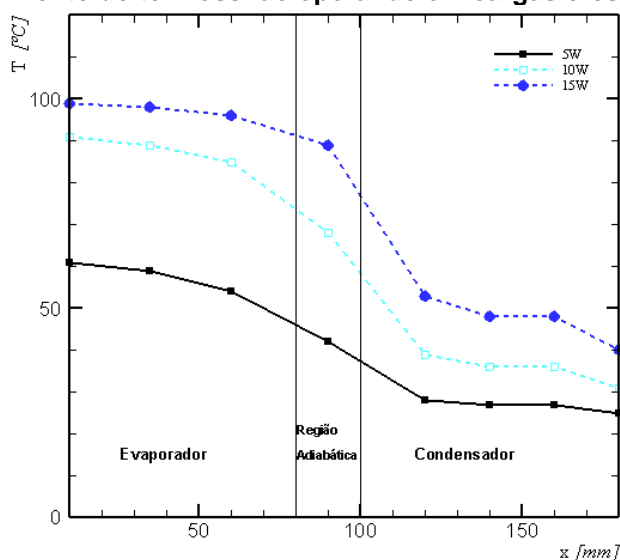
Tabela 18 - Temperaturas em regime quase permanente obtidas no funcionamento ao longo do termossifão, com nanofluido a 10% de concentração, operando em cargas decrescentes.

Potência [W]	$T_{evap,1}$ [°C]	$T_{evap,2}$ [°C]	$T_{evap,3}$ [°C]	T_{adiab} [°C]	$T_{cond,1}$ [°C]	$T_{cond,2}$ [°C]	$T_{cond,3}$ [°C]	$T_{cond,4}$ [°C]	T_{amb} [°C]
15	99,67	98,11	96,98	89,78	53,61	48,52	48,09	40,82	18,31
10	89,07	88,05	86,53	70,21	39,80	36,69	36,54	32,03	18,86
5	64,12	61,84	56,30	44,22	28,84	27,31	27,28	25,12	18,30

Fonte: Autoria Própria.

O Gráfico 12 apresenta a distribuição das temperaturas, em regime quase permanente, em função do comprimento do dispositivo, quando operando com cargas térmicas crescentes.

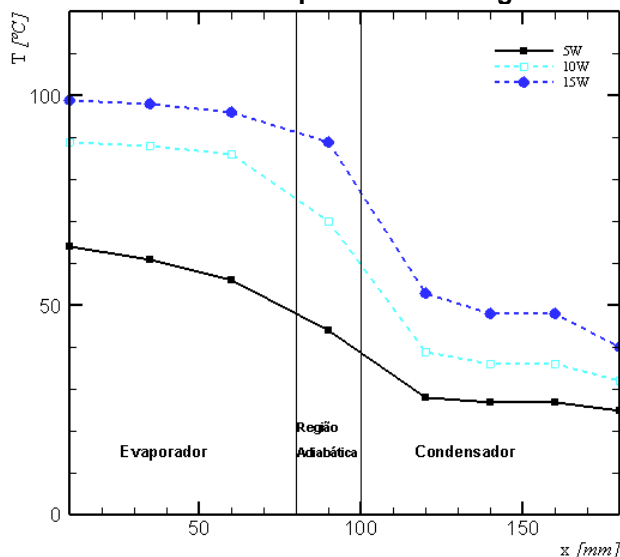
Gráfico 12 - Temperaturas registradas em regime quase permanente em função do comprimento do termossifão operando em cargas crescentes.



Fonte: Autoria Própria.

As temperaturas em regime quase permanente registradas quando o dispositivo passivo operava sob cargas térmicas decrescentes estão indicados pelo Gráfico 13.

Gráfico 13 - Temperaturas registradas em regime quase permanente em função do comprimento do termossifão operando em cargas decrescentes.



Fonte: Autoria Própria.

Com exceção da carga térmica de 5W, não foi possível notar um gradiente de temperaturas considerável tanto no evaporador quanto no condensador. Desta forma, foi analisado que ambas as regiões operaram de maneira quase isotérmica nas potências de 10 e 15W.

A temperatura de operação do termossifão, ou seja, a temperatura da região adiabática e a resistência térmica do dispositivo para cargas térmicas crescentes estão apresentados pela Tabela 19.

Tabela 19 - Temperatura da região adiabática e resistência térmica do termossifão, operando com nanofluido em concentração de 10%, na inclinação de 45°, para cargas térmicas crescentes.

Potência [W]	Temperatura de Operação [°C]	Resistência Térmica [°C/W]
5	42,74	6,13±0,60
10	68,83	5,29±0,32
15	89,78	3,36±0,20

Fonte: Autoria Própria.

Os valores de temperatura de operação e resistência térmica estão indicados pela Tabela 20.

Tabela 20 - Temperatura da região adiabática e resistência térmica do termossifão, operando com nanofluido em concentração de 10%, na inclinação de 45°, para cargas térmicas decrescentes.

Potência [W]	Temperatura de Operação [°C]	Resistência Térmica [°C/W]
15	89,78	3,36±0,20
10	70,21	5,14±0,31
5	44,22	6,66±0,60

Fonte: Autoria Própria.

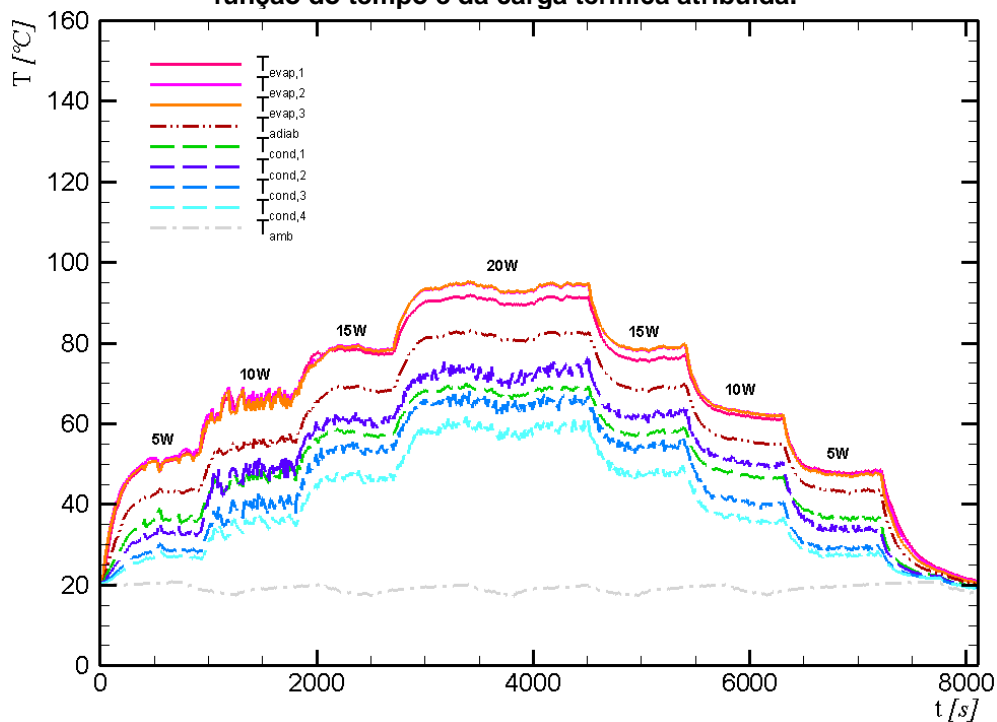
4.3 TERMOSSIFÃO COM NANOFLUIDO 20%

Os resultados experimentais obtidos para o termossifão preenchido com nanofluido de ouro como fluido de trabalho, com concentração de 20%, operando em duas configurações diferentes, são apresentados nesta subseção.

4.3.1 Posição Vertical (90°)

O Gráfico 14 apresenta a distribuição de temperaturas em função do tempo para as potências as quais o termossifão contendo nanofluido 20% foi submetido durante os testes experimentais.

Gráfico 14 - Distribuição das temperaturas ao longo do termossifão, em posição vertical, em função do tempo e da carga térmica atribuída.



Fonte: Autoria Própria.

Para o termossifão, o regime quase permanente se estabeleceu por volta de 500s após a aplicação da primeira carga térmica. Com a potência de 20W, o regime quase permanente foi atingido com a temperatura de operação de 93,30°C. Para a carga térmica subsequente (25W), a temperatura de 100°C seria atingida, impossibilitando a utilização da mesma. Em seguida, reduziu-se a potência para 15W, e assim sucessivamente até não haver aplicação de carga térmica sobre o termossifão.

A Tabela 21 mostra a temperatura no qual regime quase permanente foi atingido no termossifão, para as diferentes cargas térmicas atribuídas, de maneira crescente, de 5 à 20W.

Tabela 21 – Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem crescente.

Potência [W]	$T_{evap,1}$ [°C]	$T_{evap,2}$ [°C]	$T_{evap,3}$ [°C]	T_{adiab} [°C]	$T_{cond,1}$ [°C]	$T_{cond,2}$ [°C]	$T_{cond,3}$ [°C]	$T_{cond,4}$ [°C]	T_{amb} [°C]
5	51,74	52,46	51,60	43,28	36,36	32,94	28,65	27,01	20,28
10	67,08	66,76	65,84	55,71	47,43	48,94	39,97	35,86	19,36
15	77,49	78,53	78,29	68,26	57,25	60,71	53,59	46,34	18,07
20	91,21	94,29	94,50	82,41	68,64	73,77	65,62	59,30	19,71

Fonte: Autoria Própria.

De modo semelhante a Tabela 22, mostra que o regime quase permanente atingido foi registrado, quando as cargas térmicas foram atribuídas de maneira decrescente, para o termossifão.

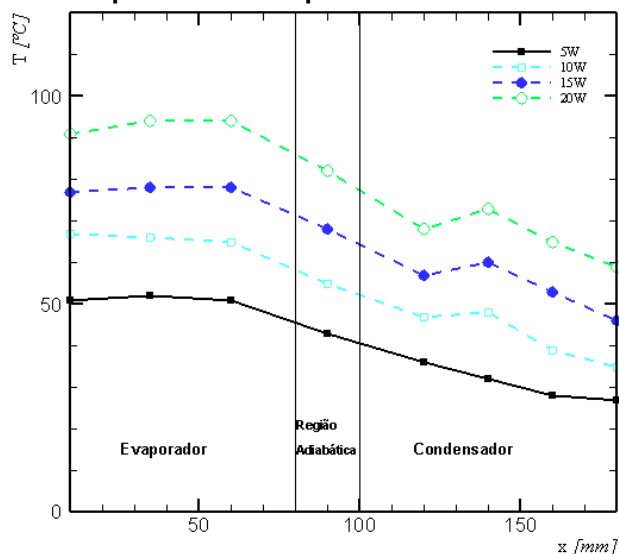
Tabela 22 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem decrescente.

Potência [W]	$T_{evap,1}$ [°C]	$T_{evap,2}$ [°C]	$T_{evap,3}$ [°C]	T_{adiab} [°C]	$T_{cond,1}$ [°C]	$T_{cond,2}$ [°C]	$T_{cond,3}$ [°C]	$T_{cond,4}$ [°C]	T_{amb} [°C]
20	91,21	94,29	94,50	82,41	68,64	73,77	65,62	59,30	19,71
15	76,38	78,88	79,07	69,13	58,17	62,74	54,80	48,03	19,12
10	61,29	62,26	62,17	55,06	46,66	49,80	40,04	35,83	18,11
5	48,10	47,69	47,38	43,31	36,52	33,73	29,15	27,60	20,11

Fonte: Autoria Própria.

O Gráfico 15 mostra a distribuição das temperaturas ao longo do termossifão, quando o regime quase permanente foi atingido, em função do comprimento do termossifão, para as diferentes potências dissipadas, em ordem crescente.

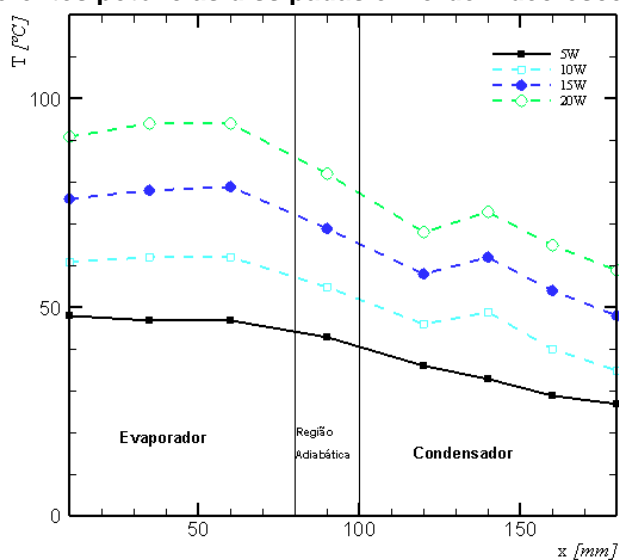
Gráfico 15 - Distribuição das temperaturas em função do comprimento do termossifão para as diferentes potências dissipadas em ordem crescente.



Fonte: Autoria Própria.

Assim como para as potências dissipadas em ordem crescente, o Gráfico 16 apresenta as temperaturas obtidas em regiões do termossifão, quando estas operaram em regime quase permanente, em função do comprimento do termossifão, para as potências dissipadas em ordem decrescente.

Gráfico 16 - Distribuição das temperaturas em função do comprimento do termossifão para as diferentes potências dissipadas em ordem decrescente.



Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 23 apresenta o comportamento da temperatura de operação do termossifão, ou seja, a temperatura da região adiabática e os valores de resistência térmica do termossifão para as diferentes potências atribuídas crescentemente.

Tabela 23 - Temperatura de operação e resistência térmica do termossifão, operando com nanofluido com 20% de concentração, para as diferentes cargas térmicas aplicadas em ordem crescente.

Potência [W]	Temperatura de Operação [°C]	Resistência Térmica [°C/W]
5	43,28	4,14±0,57
10	55,71	2,34±0,28
15	68,26	1,57±0,18
20	82,41	1,32±0,14

Fonte: Autoria Própria.

A análise também foi realizada com as cargas térmicas aplicadas em ordem decrescente considerando o termossifão carregado com nanofluido com concentração de 20% em água, e os resultados estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Temperatura de operação e resistência térmica do termossifão, operando com nanofluido com 20% de concentração, para as diferentes cargas térmicas aplicadas em ordem decrescente.

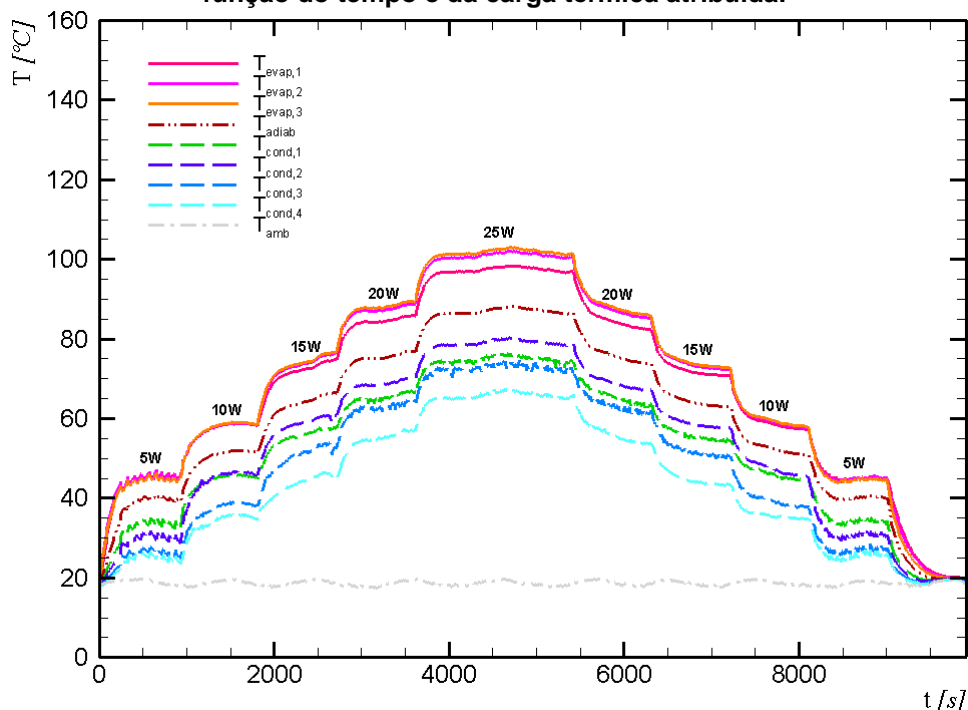
Potência [W]	Temperatura de Operação [°C]	Resistência Térmica [°C/W]
20	82,41	1,32±0,14
15	69,13	1,47±0,18
10	55,06	1,88±0,28
5	43,31	3,17±0,55

Fonte: Autoria Própria.

4.3.2 Posição Inclinada em 45°

O Gráfico 17 apresenta a distribuição das temperaturas ao longo do termossifão em função do tempo para as diferentes potências aplicadas, com o termossifão na posição de 45°.

Gráfico 17 - Distribuição das temperaturas ao longo do termossifão, com inclinação de 45°, em função do tempo e da carga térmica atribuída.



Fonte: Autoria própria.

Para o termossifão na posição inclinada em 45°, o regime quase permanente estabeleceu-se por volta de 500s após a aplicação da primeira carga térmica. Com a potência de 25W, o regime quase permanente foi atingido com a temperatura de operação de 99,68°C. Para a carga térmica subsequente (30W), a temperatura de 100°C seria atingida, impossibilitando a utilização da mesma. Em seguida, reduziu-se a potência para 20W, e assim sucessivamente até não haver aplicação de carga térmica sobre o termossifão.

A Tabela 25, indica a temperatura que o regime quase permanente foi atingido, quando as cargas térmicas foram atribuídas de maneira decrescente, para o termossifão.

Tabela 25 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão, com inclinação de 45°, para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem crescente.

Potência [W]	$T_{evap,1}$ [°C]	$T_{evap,2}$ [°C]	$T_{evap,3}$ [°C]	T_{adiab} [°C]	$T_{cond,1}$ [°C]	$T_{cond,2}$ [°C]	$T_{cond,3}$ [°C]	$T_{cond,4}$ [°C]	T_{amb} [°C]
5	45,18	44,94	44,66	40,32	34,30	31,00	27,39	26,04	19,01
10	57,58	58,06	58,36	51,27	44,84	45,88	38,07	35,05	18,28
15	70,96	72,57	73,04	63,20	54,67	57,86	50,69	43,53	18,01
20	82,84	85,66	86,43	74,21	63,79	67,52	61,69	54,10	18,13
25	97,02	100,56	101,47	86,60	74,26	78,66	72,17	65,39	18,06

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 26 mostra para as diferentes cargas térmicas atribuídas em ordem crescente, as temperaturas onde o regime quase permanente foi atingido.

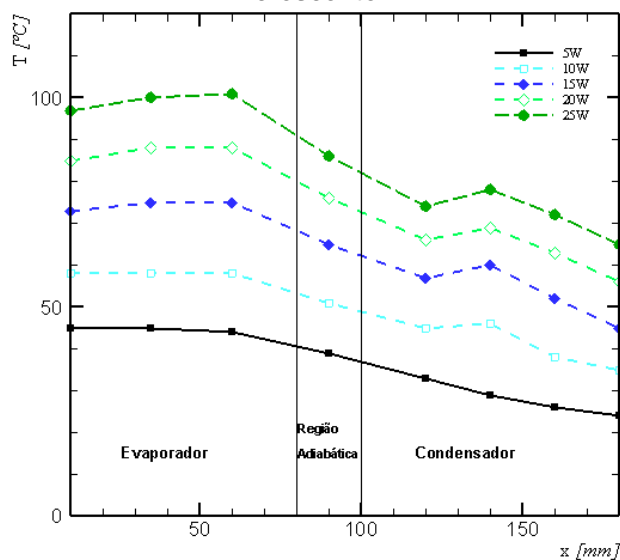
Tabela 26 - Temperatura de regime quase permanente atingida no termossifão, com inclinação de 45°, para as diferentes cargas térmicas em ordem decrescente.

Potência [W]	$T_{evap,1}$ [°C]	$T_{evap,2}$ [°C]	$T_{evap,3}$ [°C]	T_{adiab} [°C]	$T_{cond,1}$ [°C]	$T_{cond,2}$ [°C]	$T_{cond,3}$ [°C]	$T_{cond,4}$ [°C]	T_{amb} [°C]
25	97,02	100,56	101,47	86,60	74,26	78,66	72,17	65,39	18,06
20	85,35	88,18	88,93	76,33	66,23	69,59	63,78	56,52	19,12
15	73,94	75,46	75,87	65,71	57,29	60,34	52,78	45,67	19,21
10	58,64	58,71	58,90	51,83	45,63	46,38	38,64	35,55	18,93
5	45,70	45,39	44,82	39,85	33,38	29,92	26,22	24,76	18,45

Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 18 mostra a distribuição das temperaturas ao longo do termossifão, quando o regime quase permanente foi atingido, em função do comprimento do termossifão, para as diferentes potências dissipadas, em ordem crescente.

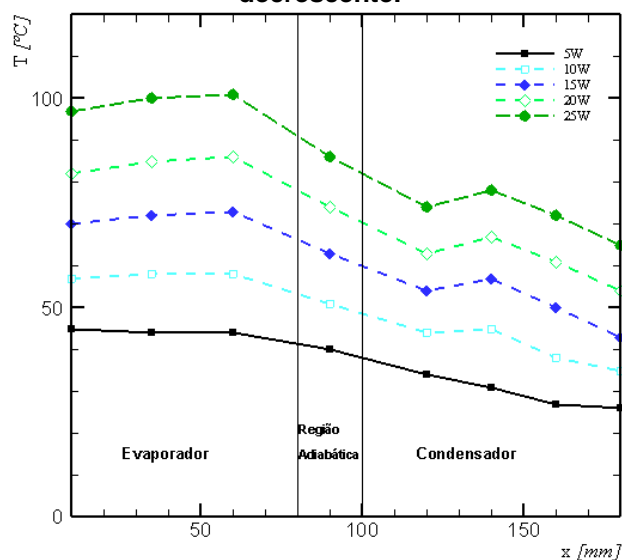
Gráfico 18 - Distribuição das temperaturas ao longo do termossifão para carga térmica crescente.



Fonte: Autoria própria.

Assim como para as potências dissipadas em ordem crescente, o Gráfico 19 apresenta a distribuição das temperaturas ao longo do termossifão, quando o regime quase permanente foi atingido para as potências dissipadas em ordem decrescente.

Gráfico 19 - Distribuição das temperaturas ao longo do termossifão para o carga térmica decrescente.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 27 apresenta o comportamento da temperatura de operação do termossifão, ou seja, a temperatura da região adiabática, em [°C], e os valores de resistência térmica do termossifão, em [°C/W], para as diferentes potências atribuídas crescentemente.

Tabela 27 - Temperatura de operação e resistência térmica do termossifão, operando com nanofluido com 20% de concentração, para as diferentes cargas térmicas aplicadas em ordem crescente.

Potência [W]	Temperatura de Operação [°C]	Resistência Térmica [°C/W]
5	39,85	3,31±0,56
10	51,83	1,72±0,28
15	65,71	1,40±0,18
20	76,33	1,17±0,14
25	86,60	1,08±0,11

Fonte: Autoria própria.

A análise também foi realizada com as cargas térmicas aplicadas em ordem decrescente, e os resultados estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Temperatura de operação e resistência térmica do termossifão, operando com nanofluido com 20% de concentração, para as diferentes cargas térmicas aplicadas em ordem decrescente.

Potência [W]	Temperatura de Operação [°C]	Resistência Térmica [°C/W]
25	86,60	1,08±0,11
20	74,21	1,16±0,14
15	63,20	1,37±0,18
10	51,27	1,70±0,27
5	40,32	3,02±0,55

Fonte: Autoria própria.

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS TERMOSSIFÕES

Nesta seção será realizada a comparação entre o comportamento térmico do termossifão com os diferentes fluidos de trabalho em operação, a característica do carga térmica e também suas diferentes inclinações.

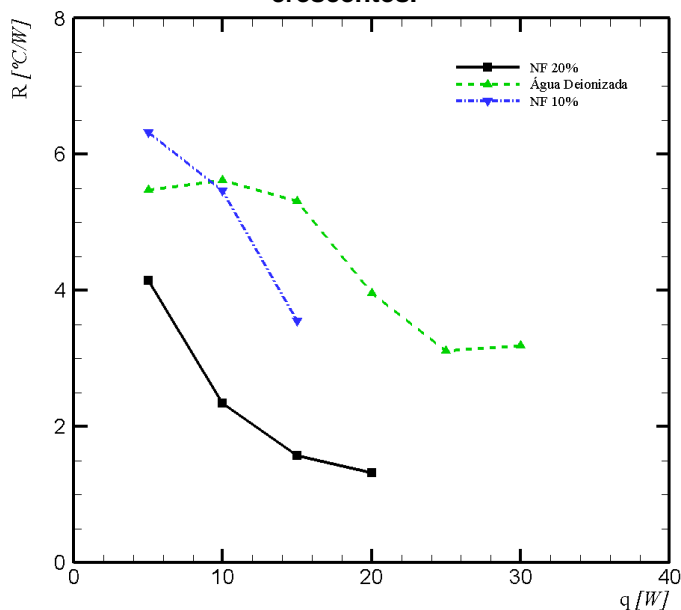
4.4.1 Posição Vertical (90°)

Para a posição vertical, comparou-se o desempenho dos fluidos de trabalho em relação à resistência e também qual carga térmica, crescente ou decrescente, registrou os melhores comportamentos para a operação do termossifão.

4.4.1.1 Comparação entre os Fluidos de Trabalho

O Gráfico 20 mostra a resistência térmica ao fluxo de calor quando comparados os fluidos de trabalho, para as diferentes cargas térmicas atribuídas aos termossifões em ordem crescente.

Gráfico 20 - Comparação da resistência térmica dos termossifões expostos a cargas térmicas crescentes.



Fonte: Autoria Própria.

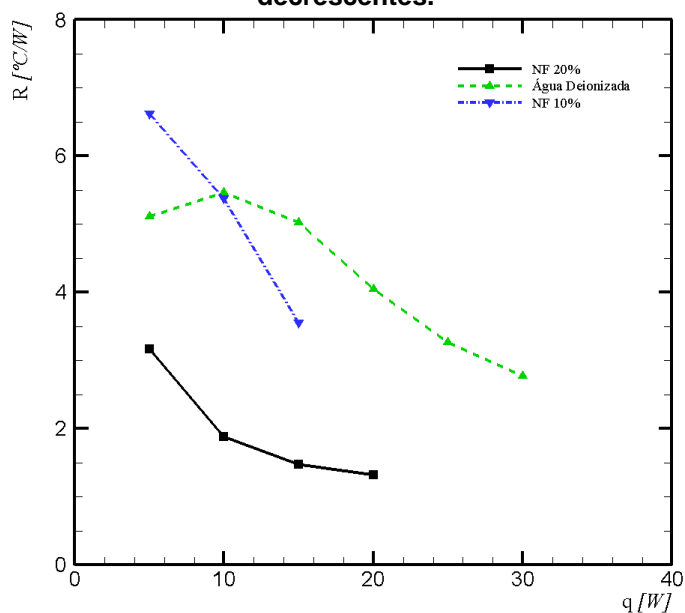
Como se pôde notar, o nanofluido de ouro com concentração de 20% em água apresentou melhores valores de resistência quando comparado com a água deionizada, quando expostas à cargas térmicas crescentes. Para 5W, foi percebido uma diminuição de 32,5% na resistência térmica, já o melhor valor da resistência foi alcançado para a carga térmica de 15W, onde esta diminuição tem ordem de 238,2%.

Com relação ao nanofluido com 10% de concentração em água, foi notado que a melhora na resistência térmica global do conjunto só aconteceu a partir de 10W de potência. Na primeira carga térmica, 5W, houve uma piora no desempenho térmico do termossifão em cerca de 13,3%. Quando se aumentou para 10W, a resistência térmica do conjunto foi reduzida em 3,0%, alcançando 49,8% na carga máxima suportada, 15W.

É possível notar ainda, que o melhor fluido de trabalho indicado para a intensificação da transferência de calor no termossifão é o nanofluido com concentração de 20% em água, haja vista que os valores, quando comparados com a outra configuração do nanofluido, apresentaram-se na ordem de 52,9% a 133,3% melhores no que diz respeito à resistência térmica.

Quando comparados os cargas térmicas atribuídos em ordem decrescente, o Gráfico 21 apresenta os valores de resistência térmica obtidos.

Gráfico 21 - Comparação da resistência térmica dos termossifões expostos a cargas térmicas decrescentes.



Fonte: Autoria própria.

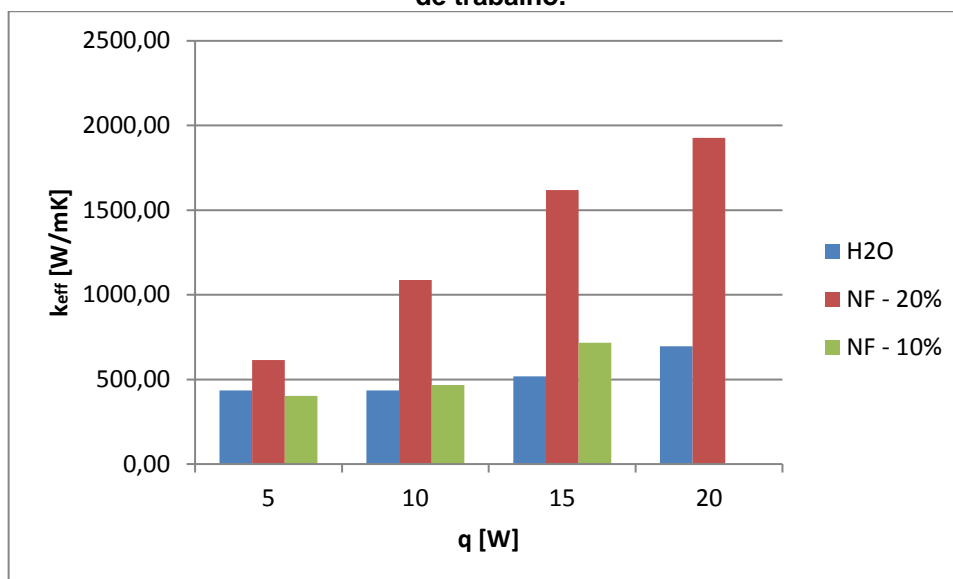
Novamente o nanofluido com 20% de concentração em água obteve os melhores resultados para resistência térmica durante a operação do termossifão. Quando comparado com a água deionizada, os valores de resistência diminuíram 70,0% já na aplicação da primeira carga térmica, 5W, e seu melhor desempenho também acontece na carga térmica de 15W, quando a resistência térmica global diminuiu 241,2% quando comparado à água deionizada.

Quando se alterou a concentração do nanofluido de ouro para 10% em água, foi notado que, na exposição à carga térmica de 5W, o mesmo apresentou valores inferiores em relação à água, assim como no fluxo crescente. Porém, estes resultados estão na ordem de 22,9% maiores quando comparados à resistência térmica. Na aplicação de 15W de carga térmica, o valor da resistência térmica do dispositivo já diminuiu cerca de 41,6% em relação à água deionizada.

Comparando as concentrações para o carga térmica decrescente, foi percebida, novamente, uma maior intensificação da transferência de calor quando a concentração foi de 20%, visto que, a diminuição nos valores de resistência térmica, quando comparados com a concentração de 10%, foram de 108,7% na aplicação de 5W e 186,1% em 15W.

A análise da condutividade térmica efetiva (k_{eff}) do dispositivo passivo de transferência de calor também foi analisada, e seu comportamento, para cargas térmicas crescentes, está apresentado no Gráfico 22.

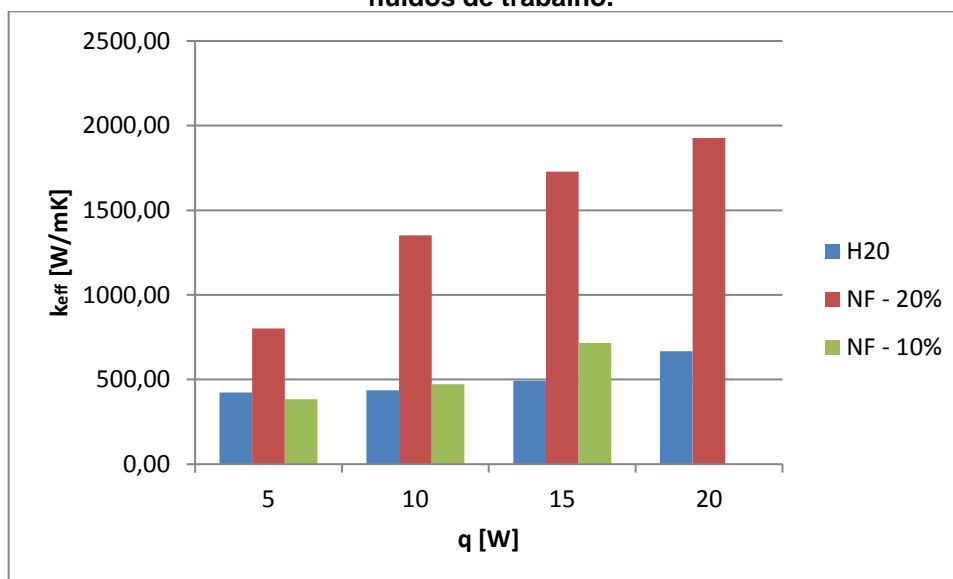
Gráfico 22 - Comparação da condutividade térmica dos termossifões com os diferentes fluidos de trabalho.



Fonte: Autoria Própria.

O Gráfico 23 mostra os valores de condutividade térmica efetiva (k_{eff}) do termossifão, para os cargas térmicas em ordem decrescentes.

Gráfico 23 - Comparação da condutividade térmica efetiva dos termossifões com os diferentes fluidos de trabalho.



Fonte: Autoria Própria.

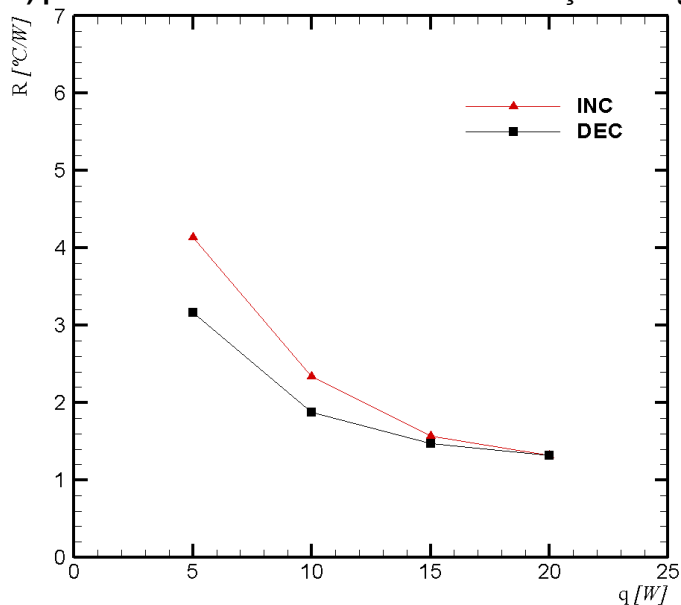
Percebe-se que os valores de condutividade térmica foram significativamente superiores na utilização do nanofluido de ouro, na concentração de 20% em água. Também foi percebido que, a partir da potência de 10W, o

nanofluido com 10% de concentração em água apresentou valores superiores aos da água deionizada.

4.4.1.2 Comparação entre a Configuração do Fluxo de Calor

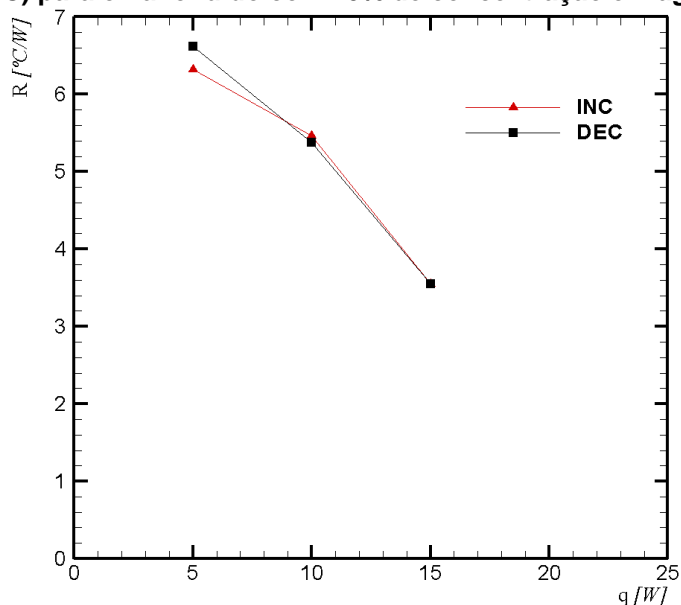
Com relação à configuração atribuída ao termossifão durante sua operação, os Gráficos 24, 25 e 26 apresentam os valores obtidos quanto à resistência térmica para os fluidos de trabalho, nanofluido de ouro 20%, nanofluido de ouro 10% e água deionizada, respectivamente.

Gráfico 24 - Comparação da resistência térmica para fluxos crescentes (INC) e decrescentes (DEC) para o nanofluido com 20% de concentração em água.



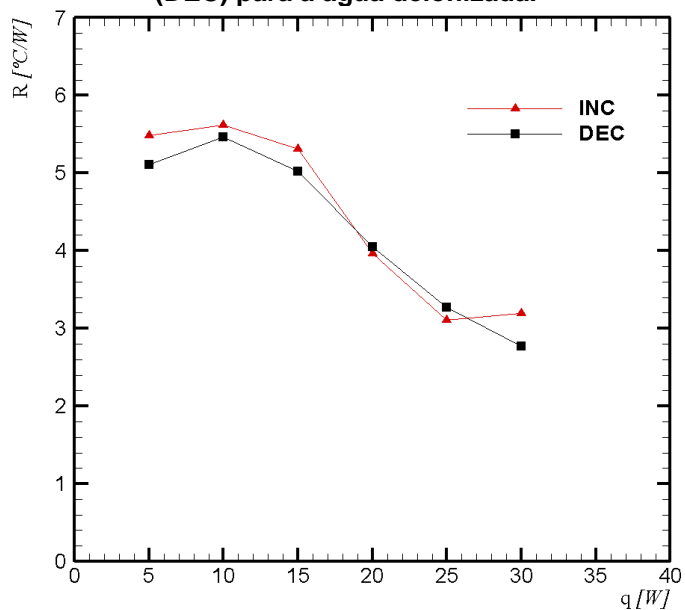
Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 25 - Comparação da resistência térmica para fluxos crescentes (INC) e decrescentes (DEC) para o nanofluido com 10% de concentração em água.



Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 26 - Comparação da resistência térmica para fluxos crescentes (INC) e decrescentes (DEC) para a água deionizada.



Fonte: Autoria Própria.

É possível notar que, para o nanofluido com 20% de concentração em água, os valores de resistência térmica foram melhores quando o carga térmica aplicado se dava em ordem decrescente. Enquanto que para o nanofluido com concentração de 10% em água, o comportamento da resistência se mostrou melhor no carga

térmica em ordem crescente e com a potência de 5W. Quando alterou-se para 10W, o desempenho de ambas as configurações foram praticamente iguais. Para a água deionizada, os melhores valores de resistência térmica foram apresentados na configuração de carga térmica decrescente.

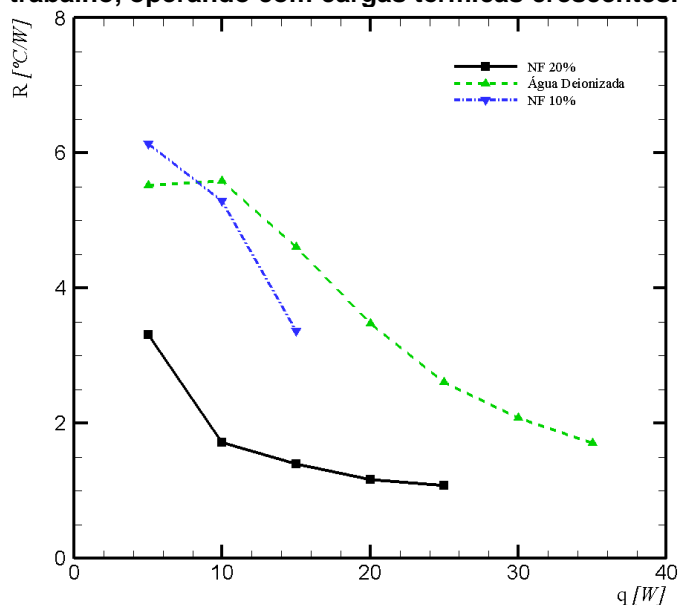
4.4.2 Posição Inclinada em 45°

Para a posição inclinada em 45°, comparou-se o desempenho térmico dos termossifões com os três fluidos de trabalho diferentes, além de se analisar as respectivas configurações do fluxo de calor.

4.4.2.1 Comparação entre os Fluidos de Trabalho

O Gráfico 27 comparam-se as resistências térmicas ao fluxo de calor obtidas para o termossifão com inclinação de 45°, para cargas térmicas crescentes, operando com os fluidos de trabalho: água deionizada e nanofluidos de ouro com concentrações de 10 e 20% em água.

Gráfico 27 - Resistências térmicas apresentadas pelos termossifões com diferentes fluidos de trabalho, operando com cargas térmicas crescentes.



Fonte: Autoria Própria.

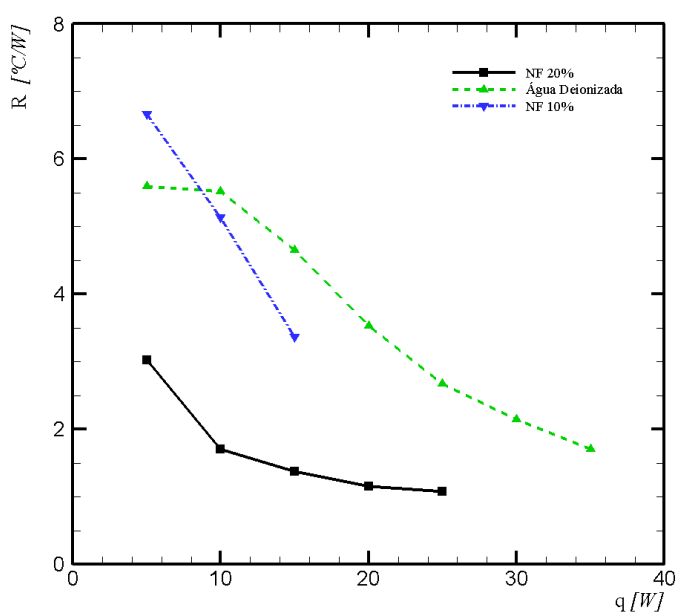
Foi possível notar que, assim como para a posição vertical, o fluido de trabalho que apresentou os melhores valores com relação ao seu desempenho térmico, ou seja, menores valores de resistência térmica foi o nanofluido de ouro, com concentração de 20% em água. No que se diz respeito à água deionizada, o nanofluido apresentou valores de resistência térmica ao fluxo de calor entre 85,2% e 240,6% menores.

A alteração da concentração do nanofluido para 10% em água, também indicou valores de resistência menores que os apresentados pela água deionizada. Porém, essa melhora somente foi efetiva nas potências de 10 e 15W, onde a redução da resistência foi de 5,7% e 37,1%, respectivamente. Na carga térmica de 5W, o valor da resistência foi de 10% maior que o da água deionizada.

Na comparação da melhor concentração para se utilizar como intensificador de transferência de calor, destacou-se a de 20% em água, uma vez que os valores apresentados de resistência térmica, foram de 85,3% à 207,9% inferiores aos da outra concentração.

As comparações dos cargas térmicas em ordem decrescente estão apresentadas no Gráfico 28.

Gráfico 28 - Resistências térmicas apresentadas pelos termossifões com diferentes fluidos de trabalho, operando com cargas térmicas decrescentes.



Fonte: Autoria Própria.

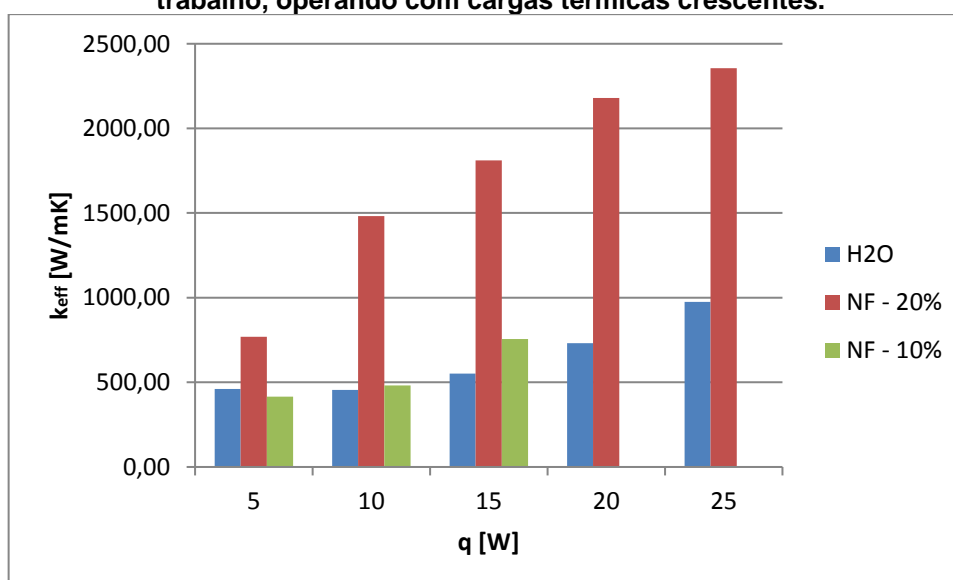
Analisando a comparação gráfica, fica evidente que o nanofluido de ouro, com concentração de 20% em água apresentou os melhores valores de resistência térmica. Em comparação com a água deionizada, a redução da condutividade foi de 66,6% a 228,1%, onde os melhores valores foram apresentados na carga térmica de 15W.

Com relação à concentração de 10% em água do nanofluido de ouro, percebeu-se que, na potência de 5W, o mesmo apresentou os resultados menos efetivos do grupo, sendo sua resistência 15,9% superior ao da água deionizada. Nas cargas térmicas seguintes, houve redução significativa nos valores de resistência, onde a melhora, em comparação com a água destilada foi de 7,4% e 38,4% nas potências de 10 e 15W, respectivamente.

Novamente o nanofluido de ouro com concentração de 20% em água apresentou o melhor comportamento térmico, quando comparado com a outra concentração, a resistência térmica foi de 120,3 à 202,5% inferiores.

No que se diz respeito à condutividade térmica efetiva, o Gráfico 29 mostra os valores obtidos para os diferentes fluidos de trabalho operando em cargas térmicas crescentes.

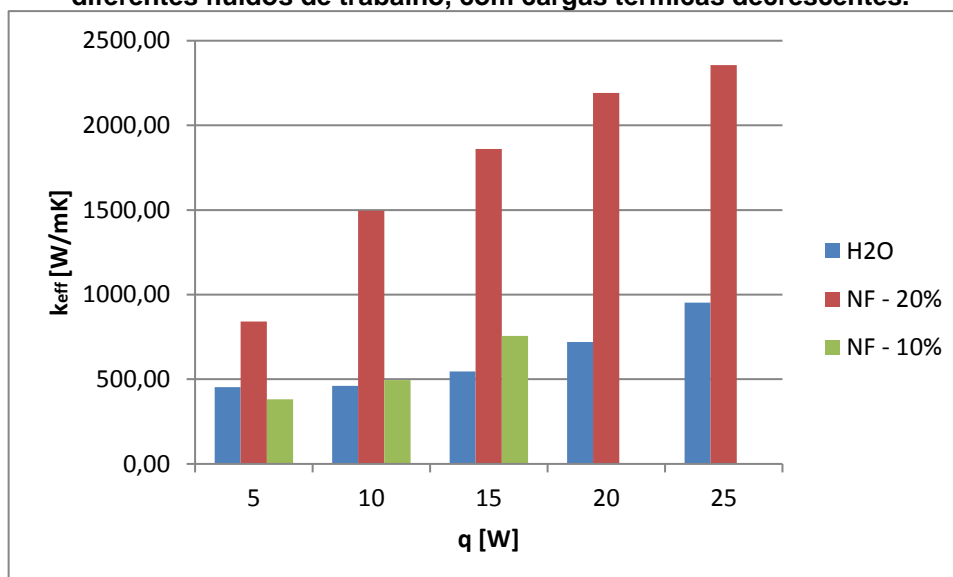
Gráfico 29 - Comparação da condutividade térmica dos termossifões com diferentes fluidos de trabalho, operando com cargas térmicas crescentes.



Fonte: Autoria Própria.

Quando o carga térmica se configurou de maneira decrescente, os valores das condutividades térmicas efetivas foram registrados e apresentados pelo Gráfico 30.

Gráfico 30 - Comparação da condutividade térmica efetiva dos termossifões operando com diferentes fluidos de trabalho, com cargas térmicas decrescentes.



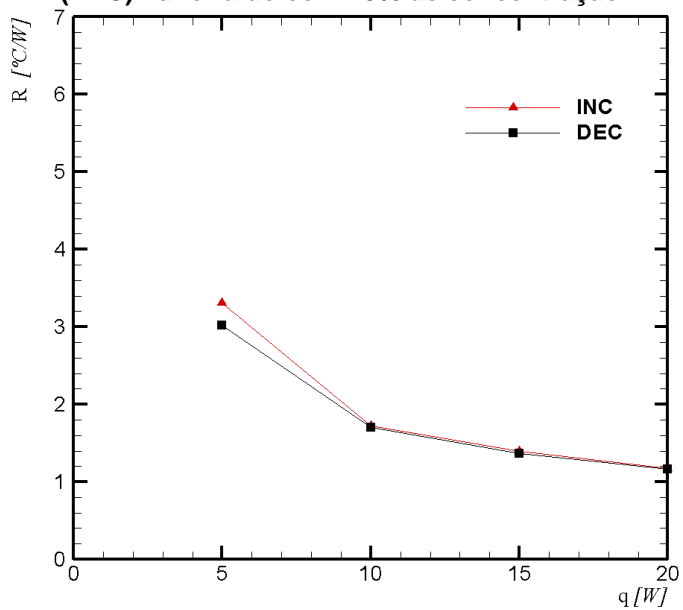
Fonte: Autoria Própria.

Novamente atestou-se a potencialidade do nanofluido de ouro com concentração de 20% em água, onde o mesmo apresentou valores muito superiores aos dos demais. Com relação ao nanofluido com 10% de concentração em água, foi visto que, a partir de 10W, sua utilização tornou-se mais indicada que a da água deionizada.

4.4.2.2 Comparação entre a Configuração do Fluxo de Calor

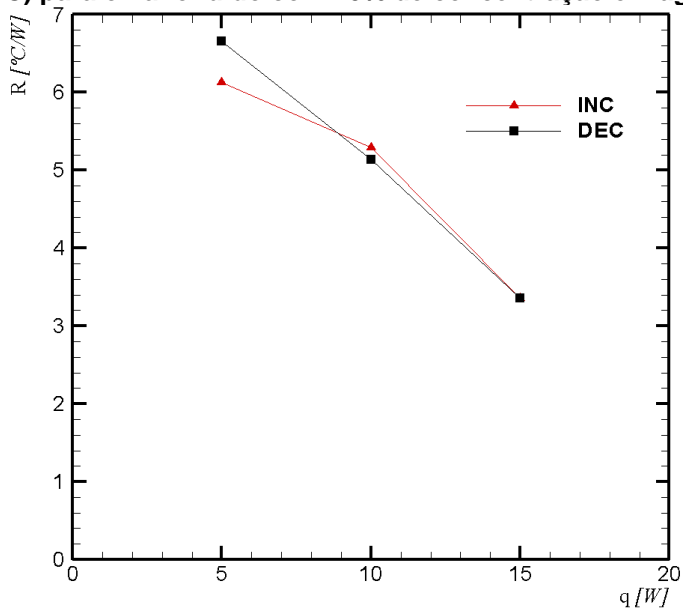
Com relação à configuração das cargas térmicas atribuídas aos termossifões, ou seja, se a mesma foi crescente ou decrescente, os Gráficos 31, 32 e 33 apresentam os valores de resistência térmica para os termossifões preenchidos com nanofluido de ouro 20%, nanofluido de ouro 10% e água deionizada, respectivamente.

Gráfico 31 - Comparação da resistência térmica para fluxos crescentes (INC) e decrescentes (DEC) nanofluido com 20% de concentração.



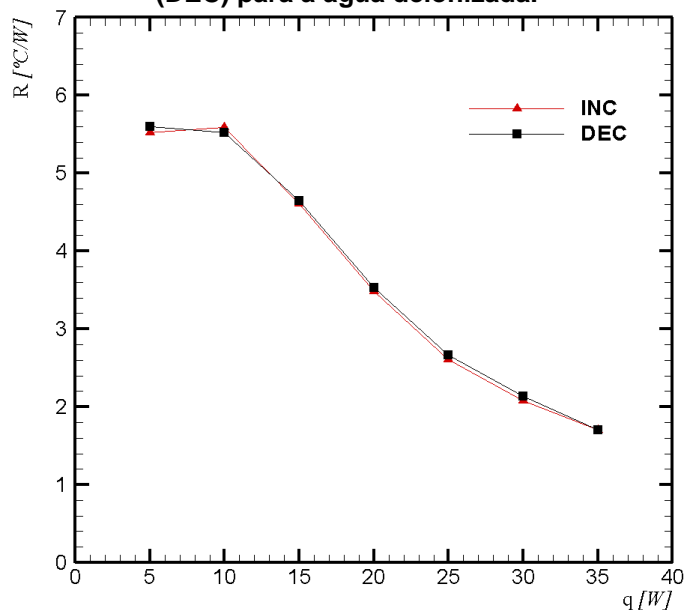
Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 32 - Comparação da resistência térmica para fluxos crescentes (INC) e decrescentes (DEC) para o nanofluido com 10% de concentração em água.



Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 33 - Comparação da resistência térmica para fluxos crescentes (INC) e decrescentes (DEC) para a água deionizada.



Fonte: Autoria Própria.

Foi percebido que os valores de resistência térmica para o nanofluido de ouro, com 20% de concentração, foram melhores quando o carga térmica estava em ordem decrescente do que o mesmo em ordem crescente. Para a concentração de 10%, esse comportamento se altera, haja vista que o melhor comportamento se deu quando o carga térmica estava em ordem crescente. Para ambos as concentrações do nanofluido de ouro foi percebido que, a partir da carga térmica de 10W, as resistências das duas configurações se equiparavam. Para a água deionizada, o comportamento da resistência térmica se mostrou imutável independente da configuração atribuída.

5 CONCLUSÃO

Neste Trabalho de Conclusão de Curso foi realizada a análise experimental de termossifões com diferentes fluidos de trabalho (água e nanofluidos de ouro com 10 e 20% em concentração) e sob duas inclinações diferentes (vertical e inclinada em 45°), todos operando em cargas térmicas em ordem crescente e, consecutivamente, decrescentes.

No que se diz respeito à inclinação, foi percebido que a resistência térmica dos dispositivos passivos de transferência de calor se mostrou inferior, ou seja, houve intensificação da transferência de calor, nos termossifões operando com inclinação de 45°, quando comparado com a posição vertical (90°).

Em relação à configuração da carga térmica, percebeu-se que há pouca influência nos valores registrados de resistência térmica, quando o carga térmica apresenta-se tanto em ordem crescente quanto decrescente, para todos os fluidos de trabalho na inclinação de 45°. Porém, na inclinação de 90°, há uma intensificação da transferência de calor, para a água deionizada e para o nanofluido com concentração de 20%, quando o carga térmica se caracteriza em ordem decrescente. Para o nanofluido com concentração de 10% em água, a melhor configuração se mostrou a de ordem crescente.

Os resultados experimentais indicaram que o melhor fluido de trabalho para a intensificação da transferência de calor foi o nanofluido de ouro com concentração de 20%, com valores muito superiores aos demais fluidos analisados.

Desta forma, pôde-se concluir que a melhor configuração para a intensificação da transferência de calor, se dá pelo nanofluido de ouro com concentração de 20% em água, operando com inclinação de 45°.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se realizar a investigação do comportamento do nanofluido de ouro aplicado à um invólucro de outro material. Também pode ser realizado uma análise da influência do diâmetro no comportamento do termossifão, além da alteração da razão de preenchimento do termossifão. Por fim, a análise de outras concentrações do nanofluido de ouro, bem como a utilização de outros nanofluidos como fluido de trabalho também se mostram pertinentes a estudos futuros.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, V. M. **Influência da Razão de Preenchimento e da Inclinação no Desempenho Térmico de Termossifões**. 2016. 135f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa.
- BRILL, R. H. The chemistry of the Lycurgus Cup. **Proceedings of the 7th International Congress on Glass**, paper 223, n. 1, p. 1-13, 1965.
- BRITO FILHO, J. P. Análise do método de avaliação de desempenho em regime permanente de termossifões bifásicos fechados. **8^o Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica**, 2007.
- BUSCHMANN, M. H.; FRANZKE, U. Improvement of thermosyphon performance by employing nanofluid. **International Journal of Refrigeration**. Dresden, v. 40, p. 416-428, 2014.
- CHOI, Stephen U.S.; Eastman, J.A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. **International Mechanical Engineering Congress & Exposition**. San Francisco, v. 1 , n. 1, p. 12-17, 1995
- DA SILVA, A. C. M. **Transferência de Calor em Nanofluidos – Potencialidades e Desafios**. 2010. 73f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade de Aveiro, Departamento de Química. Portugal.
- FAGHRI, A. Heat Pipes: Review, Opportunities and Challenges. **Frontiers in Heat Pipes**, v. 5, p. 1-48, 2014.
- FREESTONE, I.; MEEKS, N.; SAX, M.; HIGGITT, C. The Lycurgus Cup - a roman nanotechnology. **Gold Bulletin**. Marshalltown, v. 40, n. 4, p. 270-277, 2007.
- GUPTA, H. K.; AGRAWAL, G. D.; MATHUR, J. An overview of nanofluids: A new media towards green environment. **International Journal of Environmental Sciences**, v. 3, n. 1, 2012.
- HULLA, J. E.; SAHU, S. C.; HAYES, A. W. Nanotechnology: History and Future. **Human and Experimental Toxicology**, v. 34, n. 12, p. 1318-1321, 2015.

HWANG, J. ; DAIGUJI, H. Ion Transportation in Sub-10 nm Nanofluidic Channels: Synthesis, Measurement, and Modeling. **Israel Journal of Chemistry**, v.54, n. 11-12, p. 1509-1518, , 2014.

JOHN, J. *et al.* Shape dependent heat transport through green synthesized gold nanofluids. *Journal of Physics*, v. 48, n. 33, 2015.

KEBLINSKI, P.; EASTMAN, Jeffrey A.; CAHILL, D. G. Nanofluids for Thermal Transport. *Material Today*, v. 8, n. 6, p. 36-44, 2005.

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

LOPES, C. S.; LENART, V. M.; TURCHIELLO, R. F.; GÓMEZ, S. L. Dependência da refração óptica não linear de origem térmica em nanofluidos de prata com a frequência de excitação óptica. **Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada**, v. 4, n. 1, p. 72-83. 2017.

MANTELLI, M. B.H. **Curso sobre Tubos de Calor e Termossifões**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

MENEZES, A. **Conversão fototérmica em nanofluidos utilizando coletor plano montado em posicionador solar**. 2015. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. MG.

NISHIDA, F. B. **Desenvolvimento de Tubos De Calor com Microranhuras Fabricadas por Eletroerosão a Fio**. 2016. 158f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa.

OLIVEIRA, G. A.; BANDARRA FILHO, E. P. Correlações para determinar condutividade térmica e viscosidade de nanofluidos. **21º Simpósio do Programa de Pós-Graduação**, Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

PETERSON, G. P. *An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing and Application*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1994.

REAY, David A.; KEW, Peter A.; MCGLEN, Ryan J. Heat Pipes: Theory, Design and Applications. 6 ed. Waltham, MA, USA: Elsevier, 2014. 251p.

SHAMING, D.; REMITA, H. Nanotechnology: from the ancient time to nowadays. **Foundations of Chemistry**, v. 17, n. 3, p. 185-205, 2015.

TSAI, C.Y. *et al.* Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance. **Materials Letters**, v. 58, n. 9, p. 1461-1465, 2004.

XIE, H. Q. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. **Journal of Applied Physics**, v. 91, n. 9, p. 4568-4572, 2002.

XIE, H. *et al.* Thermal conductivity of suspensions containing nanosized SiC particles. **International Journal Thermophysics**, v. 23, v.2, p. 571-580, 2002.

WANG, X.; MUJUMDAR, A. S. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 46, n. 1, p. 1-19, 2006.