

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ALLEFE JARDEL CHAGAS VAZ

**SELEÇÃO DE UM TERMOSSIFÃO PARA APLICAÇÃO
EM PRÉ-AQUECEDORES DE AR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2022

ALLEFE JARDEL CHAGAS VAZ

SELEÇÃO DE UM TERMOSSIFÃO PARA APLICAÇÃO EM PRÉ-AQUECEDORES DE AR

Selection of a Thermosyphon for Air Preheaters' Application

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 (UTFPR) *Campus Ponta Grossa*.

Orientador: Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves* ✉ 

Coorientador: Eng. Mec. *Victor Vaurek Dimbarre*

PONTA GROSSA

2022



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

Esta licença permite *download* e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos aos autores, sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ALLEFE JARDEL CHAGAS VAZ

**SELEÇÃO DE UM TERMOSSIFÃO PARA APLICAÇÃO
EM PRÉ-AQUECEDORES DE AR**

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

Data de aprovação: 01 de julho de 2022.

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

Prof. Dr. Jhon Jairo Ramírez Behainne
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/Ponta Grossa)

Prof. Dr. Marcos Vinicius Barbosa
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/Ponta Grossa)

PONTA GROSSA

2022

Dedico este trabalho aos meus pais.

*Everything is possible. The impossible just
takes longer (BROWN, Dan, 1998)*

RESUMO

Termossifões são dispositivos eficazes que transferem grandes quantidades de energia na forma de calor com pequenas diferenças de temperatura utilizando o calor latente de vaporização de seu fluido de trabalho e a ação da gravidade. A aplicação desse dispositivo passivo de transferência de calor no setor industrial varia desde aquecedores de ar, regeneradores de calor, coletores solares, trocadores de calor, entre outros. Os termossifões são compostos de um tubo hermeticamente fechado dividido em três regiões distintas, o evaporador, a seção adiabática e o condensador. O objetivo deste Trabalho de Conclusão de Curso foi selecionar a melhor configuração para um termossifão visando sua aplicação em pré-aquecedores de ar, investigando experimentalmente seu desempenho térmico variando sua razão de preenchimento e inclinação de operação. Para isso foram construídos termossifões utilizando tubos de cobre de 180mm de comprimento, 9,45mm de diâmetro externo e 7,75mm de diâmetro interno, com cada região do termossifão possuindo 60mm de comprimento. O fluido de trabalho utilizado foi água destilada. O evaporador foi aquecido por uma fita resistiva de níquel-cromo e o condensador foi resfriado por convecção forçada a ar. A carga térmica fornecida ao termossifão foi de 1W até 11W com incrementos de 2W. Na primeira etapa da seleção foram analisadas razões de preenchimento de 20%, 40% e 60% considerando uma inclinação de operação de 45° em relação à horizontal. Os melhores resultados experimentais encontrados foram para uma razão de preenchimento de 40%, que apresentou a menor temperatura operacional e menor resistência térmica. Na segunda etapa da seleção esses termossifões foram testados experimentalmente nas inclinações de operação de 22,5°, 45°, 67,5° e 90° (posição vertical). A inclinação de operação selecionada foi de 45°, pois apresentou menor resistência térmica.

Palavras-chave: Termossifão. Razão de Preenchimento. Inclinação de Operação. Desempenho Térmico. Experimental.

ABSTRACT

Thermosyphons are effective devices able to transfer large amounts of energy given a small temperature difference using the working fluid latent heat and gravitational forces. This passive heat transfer device is found in many the industrial sector applications, from air preheaters, heat regeneration, solar panels, heat exchangers, to name a few. The thermosyphons are made of a hermetically sealed tube divided in three sections, the evaporator, the adiabatic section, and the condenser. The goal of this Senior Design Project was to select the best settings for a thermosyphon aiming for an air preheater application, experimentally evaluating its thermal performance varying the filling ratio and working slope. Thermosyphons were constructed with copper tubes having a length of 180mm, an outer diameter of 9.45mm and an inner diameter of 7.75mm, where each section of the thermosyphon having a length of 60mm. The working fluid used was distilled water. The evaporator was heated using a thermal resistance of nickel-chrome and the condenser was cooled by forced convection using air. The power dissipations provided to the system started at 1 to 11W, using a 2W increment. The selection first step analyzed the filling ratios of 20, 40, and 60%, using a working slope of 45° relative to the horizontal. The best results found were to the filling ratio of 40%, since it showed a smaller operational temperature and smaller thermal resistance. The selection second step analyzed the working slope of 22.5, 45, 67.5, and 90° (vertical position). The working slope selected was 45°, since it showed a smaller thermal resistance.

Keywords: Thermosyphon. Filling Ratio. Working Slope. Thermal Performance. Experimental.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferentes tipos de trocadores de calor: (a) tubos concêntricos, (b) placas e (c) casco e tubos	16
Figura 2 - Diagrama esquemático de um termossifão	17
Figura 3 - Diagrama esquemático do funcionamento de um termossifão	23
Figura 4 – Materiais do invólucro em função da temperatura	25
Figura 5 - Temperatura de operação de fluidos de trabalho para termossifões	26
Figura 6 - Tipos de trocadores de calor assistidos por termossifões	28
Figura 7 - Fluxograma das atividades da análise experimental.....	40
Figura 8 - Fluxograma das atividades da análise experimental.....	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição de temperaturas no termossifão com razão de preenchimento de 20%	41
Gráfico 2 - Distribuição de temperaturas no termossifão com razão de preenchimento de 40%	42
Gráfico 3 - Distribuição de temperaturas no termossifão com razão de preenchimento de 60%	43
Gráfico 4 - Temperatura operacional em função da carga térmica para diferentes razões de preenchimento	44
Gráfico 5 - Resistência térmica em função da carga térmica para diferentes razões de preenchimento.....	45
Gráfico 6 - Distribuição de temperaturas no termossifão com inclinação de operação de 22,5°	47
Gráfico 7 - Distribuição de temperaturas no termossifão com inclinação de operação de 45°	48
Gráfico 8 - Distribuição de temperaturas no termossifão com inclinação de operação de 67,5°	49
Gráfico 9 - Distribuição de temperaturas no termossifão com inclinação de operação 90°	50
Gráfico 10 - Temperatura operacional em função da carga térmica para diferentes inclinações de operação.....	51
Gráfico 11 - Resistência térmica em função da carga térmica para diferentes inclinações de operação.....	52

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Componentes dos termossifões.....	30
Fotografia 2 - Banho ultrassônico dos componentes dos termossifões	31
Fotografia 3 - Brasagem dos termossifões.....	31
Fotografia 4 - Teste de estanqueidade.....	32
Fotografia 5 - Procedimento de evacuação.....	33
Fotografia 6 - Preenchimento dos termossifões	34
Fotografia 7 - Brasagem do capilar	35
Fotografia 8 - Aparato experimental	36
Fotografia 9 - Termossifão instrumentado.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa de temperatura para tipos de calor residual	21
Tabela 2 - Compatibilidade entre materiais do invólucro e fluido de trabalho	24
Tabela 3 - Características dos termossifões	29
Tabela 4 - Incertezas Experimentais	39
Tabela 5 - Temperatura operacional [°C] em função da carga térmica para diferentes razões de preenchimento	44
Tabela 6 - Resistência térmica [°C/W] em função da carga térmica para diferentes razões de preenchimento	45
Tabela 7 - Temperatura operacional [°C] em função da carga térmica para diferentes inclinações de operação.....	51
Tabela 8 - Resistência térmica em função da carga térmica para diferentes inclinações de operação.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>DAMEC</i>	Departamento Acadêmico de Mecânica
<i>LabCT</i>	Laboratório de Controle Térmico
<i>UTFPR</i>	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

q	Taxa de transferência de calor	[W]
R_{th}	Resistência Térmica	[°C/W]
RP	Razão de Preenchimento	
T_{op}	Temperatura de operacional	[°C]

Subscritos

$adiab$	Adiabática
amb	Ambiente
$cond$	Condensador
$evap$	Evaporador

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos	19
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 RECUPERAÇÃO DE CALOR RESIDUAL	21
2.2 TERMOSSIFÃO	22
2.2.1 Funcionamento de um Termossifão	23
2.2.2 Componentes de um Termossifão	23
2.3 TROCADOR DE CALOR ASSISTIDO POR TERMOSSIFÕES	27
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	29
3.1 CONSTRUÇÃO DOS TERMOSSIFÕES	29
3.1.1 Características dos Termossifões	29
3.1.2 Limpeza dos Termossifões	30
3.1.3 Montagem dos Termossifões	31
3.1.4 Teste de Estanqueidade	32
3.1.5 Procedimento de Evacuação	32
3.1.6 Preenchimento dos Termossifões	33
3.2 SELEÇÃO DO TERMOSSIFÃO	35
3.2.1 Aparato Experimental	36
3.2.2 Instrumentação do Termossifão	36
3.2.3 Procedimento Experimental	37
3.2.4 Testes Experimentais	38
3.2.5 Análise de Incertezas Experimentais	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1 INFLUÊNCIA DA RAZÃO DE PREENCHIMENTO	41
4.1.1 Razão de Preenchimento de 20%	41
4.1.2 Razão de Preenchimento de 40%	42
4.1.3 Razão de Preenchimento de 60%	42
4.1.4 Temperatura Operacional para Diferentes Razões de Preenchimento	43
4.1.5 Resistência Térmica para Diferentes Razões de Preenchimento	45
4.2 INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DE OPERAÇÃO	46
4.2.1 Inclinação de Operação de 22,5°	46

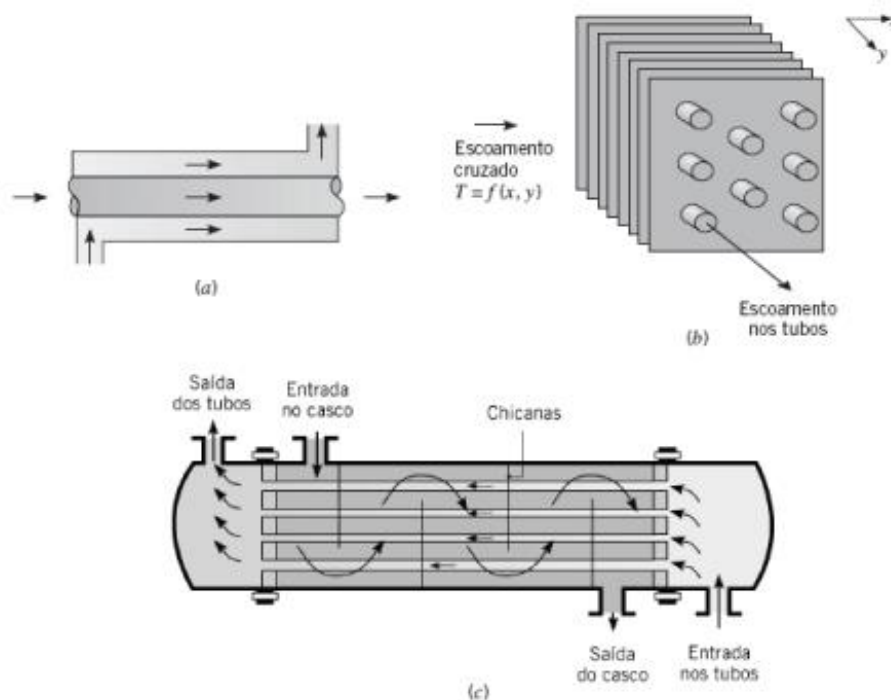
4.2.2 Inclinação de Operação de 45°	47
4.2.3 Inclinação de Operação de 67,5°	48
4.2.4 Inclinação de Operação de 90°	49
4.2.5 Temperatura Operacional para Diferentes Inclinações de Operação	50
4.2.6 Resistência Térmica para Diferentes Inclinações de Operação.....	51
5 CONCLUSÃO.....	53
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54
REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

Nas indústrias, onde o consumo de energia é alto, pode ser observada uma crescente demanda para aplicações mais eficientes de recuperação e controle de desperdício de energia, uma vez que os benefícios econômicos, assim como ambientais, vêm sendo incentivados para que exista um consumo consciente e ecologicamente sustentável (REMELI, 2015). Perdas de calor relacionadas a sistemas de geração de energia são bem comuns. Seja um gerador de energia solar, energia eólica ou por queima de combustíveis fósseis, o reaproveitamento desses desperdícios se torna cada vez mais importante.

Uma maneira de se avaliar a recuperação de energia é através de estudos experimentais da transferência de calor em trocadores de calor. Esse dispositivo facilita a troca térmica entre dois fluidos que são separados por uma resistência, sem contato entre eles. Dentre os tipos de trocadores de calor mais conhecidos destacam-se: trocador de calor de casco e tubos, trocador de calor do tipo placas e trocador de calor de tubos concêntricos (INCROPERA *et al.*, 2008) – Figura 1.

Figura 1 - Diferentes tipos de trocadores de calor: (a) tubos concêntricos, (b) placas e (c) casco e tubos



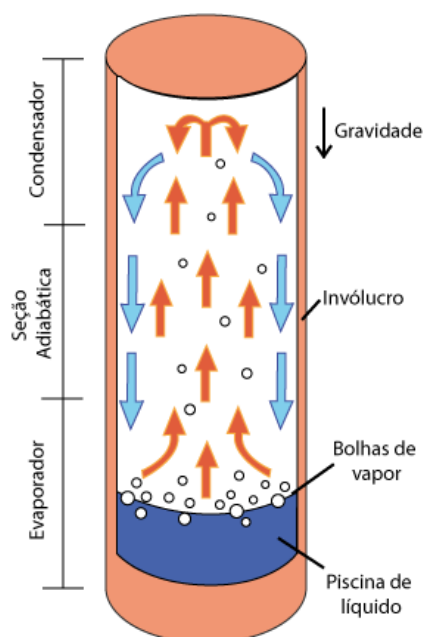
Fonte: Adaptado de Incropera *et al.* (2008)

Os trocadores de calor de casco e tubos são compostos por um casco e diversos tubos, os trocadores de calor do tipo de placas são formados por placas modulares alternadas, enquanto que no trocador de calor de tubos concêntricos esses apresentam dois tubos com diâmetros diferentes. O funcionamento desses dispositivos é realizado através do escoamento do fluido de trabalho pelo sistema; Podendo o escoamento ser de forma paralela ou contracorrente.

Trocadores de calor assistidos por termossifões apresentam flexibilidade geométrica, normalmente possuindo dois cascos ou regiões distintas que são conectadas através da seção adiabática dos termossifões (CAJAMARCA, 2016).

Termossifões são dispositivos eficazes que transferem grandes quantidades de energia na forma de calor com pequenas diferenças de temperatura utilizando o calor latente de vaporização de seu fluido de trabalho. Esse dispositivo é composto de um tubo hermeticamente fechado dividido em três regiões distintas. O evaporador é a primeira região, onde se localiza o reservatório de líquido e a adição de calor é feita, seguido da seção adiabática. A terceira região é do condensador, onde o calor é rejeitado e por efeito gravitacional o fluido retorna para o evaporador fechando o ciclo termodinâmico (MANTELLI, 2021; CHI, S.W. 1976). Na Figura 2 é apresentada um diagrama esquemático do funcionamento de um termossifão.

Figura 2 - Diagrama esquemático de um termossifão



Fonte: Autoria própria.

O fluido de trabalho, utilizado no carregamento dos termossifões é importante, pois pode alterar a capacidade de transferência de calor do dispositivo. Com a expansão na área da nanotecnologia ocorreram avanços no desenvolvimento de novas tecnologias, como por exemplo, os nanofluidos. A combinação entre um fluido base (água, óleo, ou etilenoglicol) com nanopartículas constituem esses novos fluidos, que devido às dimensões de suas partículas (inferiores a 100 nm) e sua grande área superficial, melhoram os coeficientes de transferência (WLAZLAK, *et al.*, 2018). Entretanto, em termossifões, o fluido de trabalho mais utilizado continua sendo a água.

1.1 JUSTIFICATIVA

A recuperação de energia proveniente de trocadores de calor utilizando termossifões é muito importante, pois explora a aplicação de diferentes condições operacionais para minimizar os desperdícios. Trocadores de calor são dispositivos amplamente implementados nas indústrias para conservação de energia. Trocadores de calor do tipo ar-ar podem ser aplicados de modo a pré-aquecer um sistema e diminuir o desperdício de energia.

Termossifões são dispositivos passivos de transferência de calor que cada vez mais ganham espaço no desenvolvimento de novas tecnologias voltadas a recuperação de energia. Uma investigação dos parâmetros dos termossifões, como a razão de preenchimento, inclinação de operação e fluido de trabalho, mostram-se atraentes.

Trocadores de calor do tipo ar-ar assistidos por termossifões utilizados como pré-aquecedores apresentam algumas vantagens quando comparados aos pré-aquecedores de ar convencionais. Dentre as vantagens térmicas, podemos citar a alta transferência de calor com baixos gradientes de temperatura, uma fácil manutenção e pequeno riscos de contaminação. Nesse contexto, um estudo experimental do desempenho térmico de um termossifão variando parâmetros operacionais como a razão de preenchimento e a inclinação de trabalho é muito importante para seleção da melhor configuração do dispositivo passivo para aplicação em pré-aquecedores.

1.2 OBJETIVOS

Neste item são apresentados os objetivos geral e específicos deste Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse TCC é investigar experimentalmente a melhor configuração de um termossifão para aplicação em pré-aquecedores de ar visando a recuperação de calor residual.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse Trabalho de Conclusão de Curso são:

- Projetar, fabricar/construir termossifões contendo água destilada como fluido de trabalho;
- Testar e avaliar experimentalmente os termossifões para determinar a melhor razão de preenchimento, sendo elas 20%, 40% e 60%;
- Testar e avaliar experimentalmente os termossifões para determinar a melhor inclinação de operação em relação à horizontal, sendo elas 22,5°, 45°, 67,5° e 90°;

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do presente Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica é composta por 5 capítulos. No Capítulo 1 foi apresentada uma contextualização a respeito da recuperação de energia, do termossifão e as tecnologias associadas, bem como a justificativa e os objetivos desse TCC.

No Capítulo 2 são mostrados os conceitos fundamentais sobre a recuperação de calor residual, o princípio de funcionamento dos termossifões e a aplicação de termossifões em trocadores de calor.

No Capítulo 3 são apresentados o processo de construção dos termossifões, o aparato experimental e os procedimentos utilizados durante a execução dos testes

experimentais para seleção de um termossifão para aplicação em pré-aquecedor de ar.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados dos testes experimentais, onde uma comparação do desempenho térmico sob diferentes condições de cargas térmicas e inclinações de trabalho, levando em consideração a temperatura operacional dos termossifões e sua resistência térmica, foi feita para selecionar a melhor configuração do termossifão.

Finalmente, no Capítulo 5 são expostas as conclusões desse Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica e as sugestões para trabalhos futuros. Após esse capítulo, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas durante a confecção desse TCC.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os conceitos relacionados à recuperação de calor residual, ao princípio de funcionamento de um termossifão e seus principais componentes.

2.1 RECUPERAÇÃO DE CALOR RESIDUAL

O calor residual pode ser definido como o calor gerado em processos industriais que não tem uso prático (LE *et al.*, 2014). Esse desperdício na maioria dos processos industriais é praticamente inevitáveis, uma vez que não se pode aproveitar 100% da energia de um processo devido às irreversibilidades do mesmo (HUNG, 2010).

Estima-se que a quantidade de calor residual perdido nos processos industriais pode variar entre 20% a 50% (REMELI, 2015). Com isso, a recuperação de parte dessa taxa perdida é bastante atraente, seja para utilização na geração de eletricidade, pré-aquecimento de cargas ou do ar de combustão, aquecimento de ambientes, refrigeração, dentre outros.

A viabilidade da recuperação de calor está diretamente ligada à temperatura das fontes de calor, podendo essas serem classificadas como de baixa, média e alta qualidade, que variam de acordo com uma faixa de temperatura. Algumas das fontes de calor residual são: os gases aquecidos da combustão liberados à atmosfera, produtos aquecidos através de processos industriais e transferência de calor a partir de superfícies quentes (LE, *et al.*, 2014). A Tabela 1 apresenta as faixas de temperatura e suas respectivas fontes de calor residual.

Tabela 1 - Faixa de temperatura para tipos de calor residual

Tipo de Calor Residual	Faixa de Temperatura [°C]	Fontes de Calor Residual
Alta Qualidade	Acima de 600	Refino de alumínio, níquel e sílica
Média Qualidade	230 – 600	Gases de exaustão de caldeiras, lavagem de gases
Baixa Qualidade	Abaixo de 230	Condensadores de vapor, sistema de resfriamento de condensado

Fonte: Adaptado UNEP (2006)

As tecnologias de recuperação de calor são implementadas para reduzir o custo operacional e aumentar a eficiência energética. Na geração de energia elétrica, por exemplo, o sistema mais utilizado é a partir do calor residual de turbinas a vapor. Porém, para baixas temperaturas, esses ciclos de potência a vapor são menos rentáveis devido à baixa pressão necessitar de equipamentos maiores (LE *et al.*, 2014). Em contrapartida, os geradores termoelétricos convertem energia térmica em energia elétrica de forma direta, a partir de diferentes gradientes de temperatura nas extremidades de um material semiconductor, a esse fenômeno dá-se o nome de efeito *Seebeck* (SAIDUR *et al.*, 2012).

Os geradores termoelétricos não necessitam de manutenção, tem alta confiabilidade e operação silenciosa. Entretanto, ao alto custo e indisponibilidade de materiais somam-se a baixa eficiência de conversão dessa tecnologia, que atualmente chega ao máximo de 4%, como uma das principais desvantagens desse sistema (SAIDUR *et al.*, 2012).

As aplicações de recuperação de calor residual, independentemente da tecnologia adotada, além de melhorar a eficiência energética dos processos industriais, reduzem a poluição térmica ocasionada pela liberação do calor à atmosfera. Dessa forma, o balanço econômico e sustentável buscado pelas empresas traz demasiada atenção a essa alternativa de recuperação da energia dissipada.

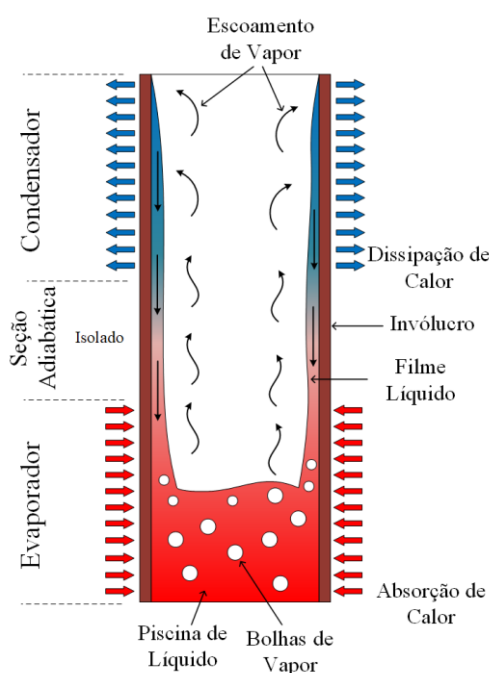
2.2 TERMOSSIFÃO

Termossifões são dispositivos passivos de transferência de calor que operam em um ciclo bifásico fechado e transferem energia térmica utilizando calor latente de vaporização de seu fluido de trabalho a partir de baixos gradientes de temperatura. Esse dispositivo é formado por um tubo metálico oco (invólucro), evacuado, sendo posteriormente inserido uma quantidade de fluido de trabalho (CAJAMARCA, 2016). O termossifão consiste de um evaporador, uma seção adiabática e um condensador, onde o evaporador localiza-se abaixo do condensador (CACUA, *et al.*, 2020).

2.2.1 Funcionamento de um Termossifão

O funcionamento de um termossifão ocorre de forma que o fluido de trabalho evapora através da quantidade de calor fornecida ao evaporador, então desloca-se por diferença de pressão através da seção adiabática até o condensador onde o vapor condensa e libera o calor latente de vaporização. Através do efeito de gravidade o fluido de trabalho retorna para o evaporador fechando o ciclo termodinâmico (SHABGARD *et al.*, 2014). A Figura 3 mostra um diagrama esquemático do funcionamento de um termossifão.

Figura 3 - Diagrama esquemático do funcionamento de um termossifão



Fonte: Machado (2022)

2.2.2 Componentes de um Termossifão

Como mencionado anteriormente, um termossifão é constituído de dois componentes principais, sendo eles o invólucro e o fluido de trabalho. As características químicas e mecânicas precisam ser compatíveis e escolhidas de forma correta para um funcionamento adequado do dispositivo passivo de transferência de calor. Podendo ser fabricado de diferentes materiais como metais e cerâmica, o invólucro é um tubo oco, enquanto que o fluido de trabalho varia de acordo com a faixa de operação. Podendo variar de metais líquidos para altas temperaturas à nitrogênio líquido para baixas temperaturas. A pressão de vapor,

condutividade térmica, estabilidade e toxicidade são outros fatores importantes no momento da escolha do fluido de trabalho (STREMEL, 2017).

O invólucro tem como função separar o fluido de trabalho das condições externas, manter o diferencial de pressão entre a atmosfera e o interior do dispositivo, sustentar que a transferência de calor com o fluido de trabalho seja efetiva, além de ser a prova de vazamentos. Em adição a condutividade térmica, a compatibilidade, porosidade, molhabilidade, ductilidade, relação força/peso e facilidade de fabricação são alguns parâmetros importantes na escolha do material (DIMBARRE, 2021).

De maneira a evitar a incompatibilidade entre o material do invólucro e do fluido de trabalho, esse material deve ser resistente à corrosão que o meio externo pode ocasionar, além de ser maleável (SHABANY, 2010). Essa incompatibilidade pode gerar gases não condensáveis no interior do dispositivo, levando-os ao condensador dessa forma bloqueando parcialmente o mesmo e diminuindo seu desempenho térmico (PETERSON, 1994).

A Tabela 2 mostra uma relação dos principais materiais recomendados para o invólucro quando comparados com o fluido de trabalho. Na Figura 4 é apresentada uma comparação entre os materiais mais comuns utilizados para fabricação de termossifões e a faixa de limite operacional de temperatura às quais eles correspondem.

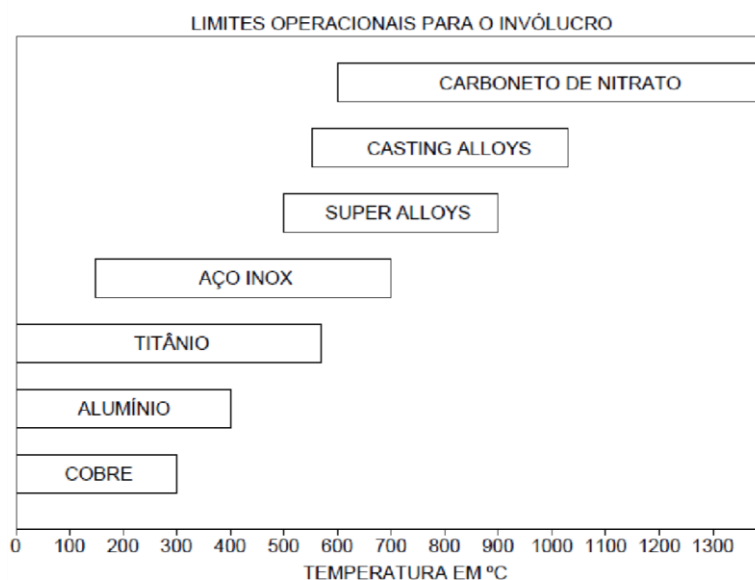
Tabela 2 - Compatibilidade entre materiais do invólucro e fluido de trabalho

Fluido de Trabalho	Material Recomendado	Material Não-Recomendado
Amônia	Alumínio Aço Carbono Níquel Aço Inoxidável	Cobre
Acetona	Cobre Sílica Alumínio e Aço Inoxidável	Não determinado
Metanol	Cobre Aço Inoxidável Sílica	Alumínio

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

Fonte: Adaptado de Mantelli (2009)

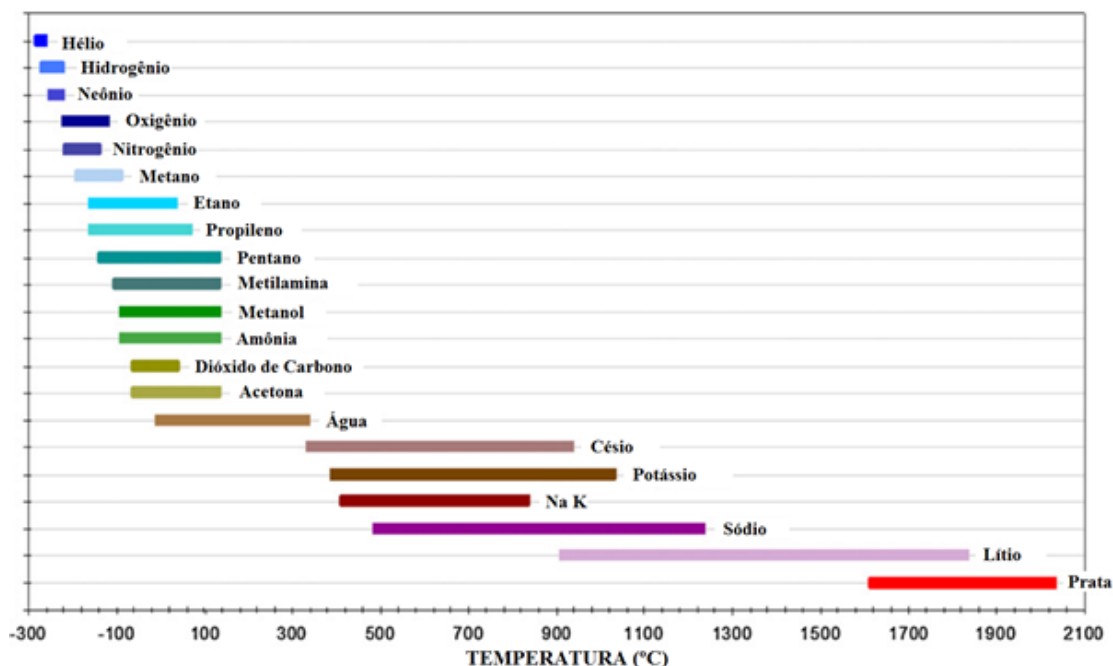
Figura 4 – Materiais do invólucro em função da temperatura



Fonte: Adaptado de Mantelli (2009)

A alteração do estado físico de líquido para vapor do fluido de trabalho é responsável pela transferência de calor no termossifão, que fornece calor através do calor latente de vaporização. Sendo assim, a seleção desse fluido de trabalho requer uma criteriosa avaliação (STREMEL, 2017). A temperatura de operação é um dos principais fatores para seleção do fluido de trabalho, uma vez que a temperatura de ebulição desse fluido necessita ser compatível com os limites de operação (PETERSON, 1994). A Figura 5 apresenta os fluidos de trabalho mais comuns e suas respectivas faixas de operação para termossifões.

Figura 5 - Temperatura de operação de fluidos de trabalho para termossifões



Fonte: Nishida (2016)

O fluido de trabalho pode operar entre temperaturas críticas e de estado triplo, sendo que acima desses valores o fluido chega ao estado de plasma. Se o fluido estiver abaixo do estado triplo o mesmo fica entre o estado sólido e vapor. Dessa forma, temperaturas críticas são estabelecidas para que o fluido de trabalho não se aproxime das temperaturas que excedam essa característica fundamental para o funcionamento dos termossifões (NISHIDA, 2016).

Uma aplicação mais recente é o uso de nanopartículas. As nanopartículas dispersas em fluido-base não interferem no calor latente de vaporização e na tensão superficial, assim, a utilização de nanofluidos consegue melhorar a transferência de calor nos termossifões. Além disso, nanofluidos apresentam temperatura de operação próxima ao de seu fluido-base, assim um maior desempenho térmico pode ser esperado (DA SILVA, 2010). Contudo, o fluido de trabalho mais utilizado continua sendo a água, principalmente devido aos benefícios econômicos quando comparados aos nanofluidos.

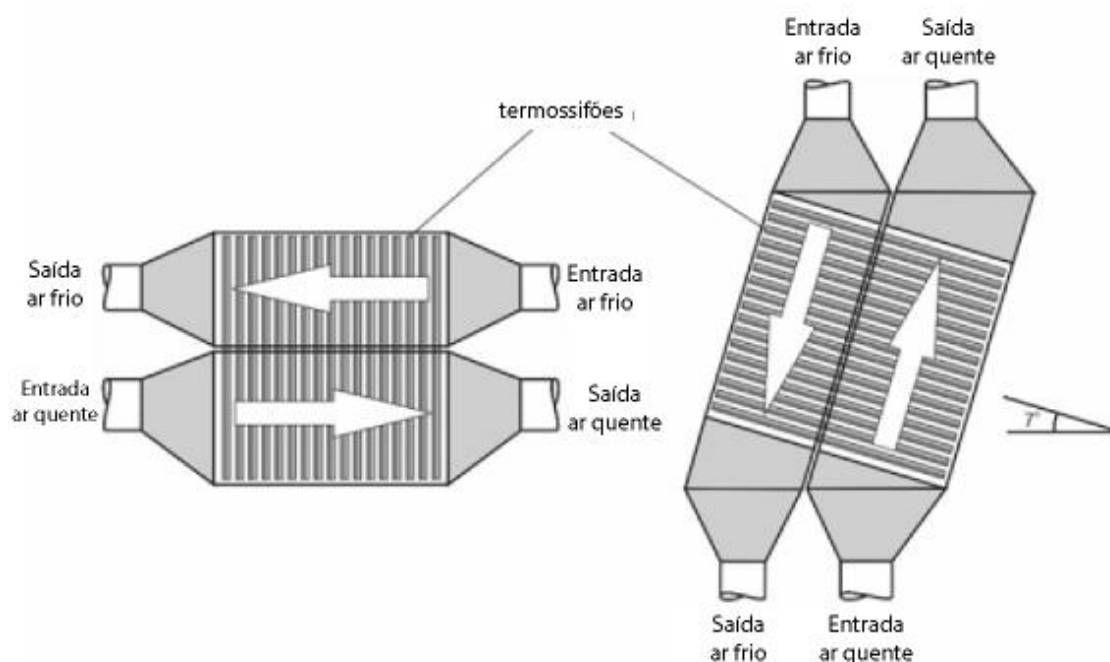
2.3 TROCADOR DE CALOR ASSISTIDO POR TERMOSSIFÕES

Um trocador de calor pode ser definido como um equipamento que utiliza um fluxo de energia térmica entre dois ou mais fluidos em diferentes temperaturas (KAKAÇ *et al.*, 2012). De acordo com Bergman *et al.* (2019), os trocadores de calor facilitam a troca entre dois fluidos que escoam em diferentes temperaturas, os mesmos estando separados. A aplicação desse equipamento abrange desde o setor energético ao químico, alimentício e ambiental, como por exemplo: indústria de processos e manufatura, aplicações espaciais, ar condicionado e refrigeração, e recuperação de energia.

A classificação dos trocadores de calor pode ser variada devido ao tipo de escoamento do mesmo, podendo ser paralelo, contracorrente e cruzado. Porém, a principal característica que diferencia esse equipamento é sua construção. Tendo como principais tipos: trocador de calor de casco e tubos, trocador de calor do tipo placas, trocador de calor de tubos concêntricos (MOHAMME *et al.*, 2012).

Trocadores de calor assistidos por termossifões são uma alternativa aos demais tipos tradicionais anteriormente citados, principalmente por terem uma geometria bastante flexível. A utilização desse tipo de trocador está em constante desenvolvimento, uma vez que uma de suas principais aplicações é a recuperação de energia. Possuindo normalmente dois cascos distintos, o princípio de funcionamento desse trocador de calor acontece pelo escoamento dos fluidos nesses cascos, onde a diferença de temperatura dos mesmos aciona o funcionamento dos termossifões que conectam esses tubos (MANTELLI, 2021). A Figura 6 mostra o esquema de um trocador de calor contendo termossifões e utilizando ar.

Figura 6 - Tipos de trocadores de calor assistidos por termossifões



Fonte: Adaptado de Mantelli (2021)

Dentre as principais vantagens entre o trocador de calor assistido por termossifões destaca-se a manutenção relativamente mais simples do equipamento uma vez que o escoamento acontece apenas nos cascos. Ainda, não há contaminação no sistema uma vez que os cascos não estão interligados como nos demais sistemas. Os trocadores de calor utilizados na indústria costumam apresentar mais de 1000 termossifões em sua composição, assim, o mal funcionamento de alguns termossifões não afeta o trocador como um todo. Sobretudo dadas condições operacionais, os termossifões vizinhos compensam a perda de alguns, uma vez que são suscetíveis a ajustes de potência do sistema (MANTELLI, 2021).

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são abordados os tópicos referentes ao processo de construção do termossifão, o aparato experimental, os procedimentos experimentais e a seleção dos termossifão utilizados nesse Trabalho de Conclusão de Curso. Os testes experimentais realizados foram executados no Laboratório de Controle Térmico (LabCT) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* Ponta Grossa.

3.1 CONSTRUÇÃO DOS TERMOSSIFÕES

Para construção dos termossifões foi utilizada a metodologia adotada por Antonini Alves *et al.* (2018) para o procedimento de limpeza, montagem, teste de estanqueidade, procedimento de evacuação e o preenchimento do termossifão com o fluido de trabalho.

3.1.1 Características dos Termossifões

Para a execução desse TCC foram utilizados três termossifões de mesmas dimensões. Esses dispositivos passivos de transferência de calor foram construídos de tubos de cobre ASTM B-75 Liga 122 sem costura, comumente utilizados em aplicados de refrigeração e ar condicionado. Os termossifões tinham comprimento total de 180mm e suas regiões tinham 60mm de comprimento cada uma. As principais características geométricas dos termossifões são mostradas na Tabela 3.

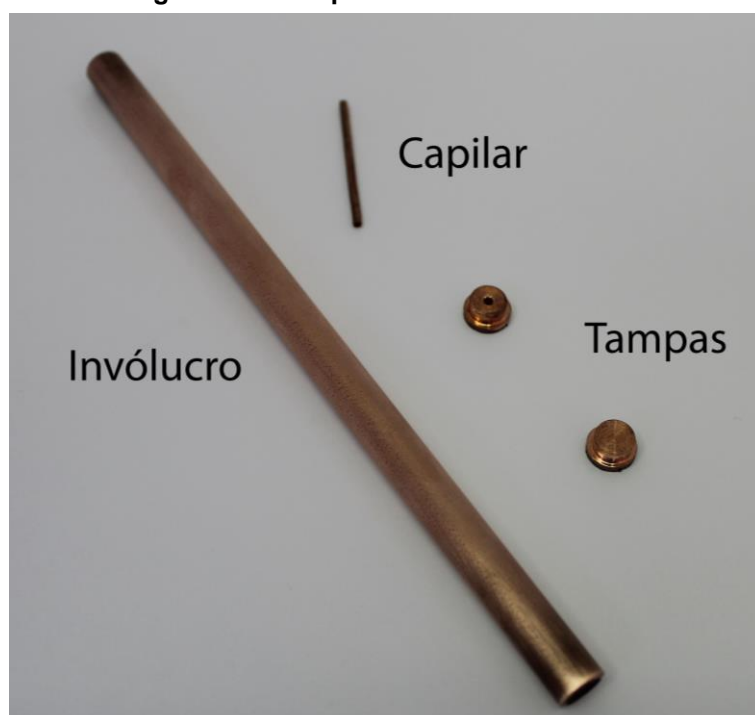
Tabela 3 - Características dos termossifões

Características	
Diâmetro interno do termossifão [mm]	7,75
Diâmetro externo do termossifão [mm]	9,45
Comprimento do evaporador [mm]	60
Comprimento da seção adiabática [mm]	60
Comprimento do condensador [mm]	60

Fonte: Autoria própria

As tampas dos termossifões, sem furo passante, foram obtidas por meio da usinagem de uma barra maciça de cobre ASTM B-75 Liga 122. Para a realização da evacuação do ar e o preenchimento com o fluido de trabalho uma das tampas foi perfurada e foram utilizados capilares com 1mm de diâmetro e 40mm de comprimento. Os componentes utilizados na montagem dos termossifões são mostrados na Fotografia 1.

Fotografia 1 - Componentes dos termossifões



Fonte: Aatoria própria.

3.1.2 Limpeza dos Termossifões

Para remoção das impurezas, garantir a molhabilidade do fluido de trabalho e melhorar a qualidade do vácuo nos termossifões deve ser feita a limpeza do invólucro, capilar e tampas (DIMBARRE, 2021). Os componentes foram limpos inicialmente com acetona para retirada das impurezas mais grosseiras, então uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4 de 0,1M) foi aplicada por no máximo 1 minuto nos componentes que foram posteriormente enxaguados com água destilada. A última etapa da limpeza foi a realização um banho ultrassônico *Kondentech*TM, onde os componentes permanecem mergulhados em acetona por 15 minutos, como mostrado na Fotografia 2.

Fotografia 2 - Banho ultrassônico dos componentes dos termossifões



Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Montagem dos Termossifões

Para junção dos elementos dos termossifões foi utilizado o processo de brasagem – Fotografia 3. Através desse processo foi feita a união das tampas ao tubo de cobre, e posteriormente aplicação do mesmo processo para fixação do capilar na extremidade adequada. O processo de brasagem foi realizado utilizando um ferro de soldar do tipo machadinha *HIKARI™ AX320* e também uma liga estanho com 12% de prata, 48% de cobre e 40% de zinco.

Fotografia 3 - Brasagem dos termossifões



Fonte: Autoria própria.

3.1.4 Teste de Estanqueidade

Essa etapa da construção dos termossifões foi necessária para atestar se o processo de brasagem dos componentes ocorreu de forma adequada. O teste de estanqueidade pressuriza internamente o termossifão com uma bomba de deslocamento positivo, então observa-se o surgimento de bolhas, caso isso não aconteça o dispositivo foi aprovado, do contrário a brasagem deve ser refeita (DIMBARRE, 2021).

Os termossifões um a um foram submetidos ao teste de estanqueidade, para isso foi feita a ligação do capilar a uma bomba de deslocamento positivo manual através de uma mangueira de polímero flexível – Fotografia 4. O termossifão foi submerso em um recipiente contendo água e ar foi inserido em seu interior através do processo de bombeamento. A validação do teste foi obtida por meio da observação ou não do surgimento de bolhas uma vez que esse procedimento seja executado.

Fotografia 4 - Teste de estanqueidade



Fonte: Autoria própria.

3.1.5 Procedimento de Evacuação

Para essa etapa foi desconectada a bomba de deslocamento manual e conectada a mangueira de polímero flexível em uma bomba de vácuo. Foi utilizada uma bomba de vácuo *EOS Value™ i260SV*, a conexão entre o capilar e a bomba de vácuo ocorreu através de uma válvula agulha ligada à bomba de vácuo por uma mangueira de borracha resistente a pressões negativas. Para garantir uma vedação

completa entre o capilar e a válvula de controle de fluxo, uma graxa de alto vácuo *Dow Corning™*, foi aplicada nas bordas da mangueira de polímero flexível conectando esses componentes.

Os termossifões devem ficar conectados por pelo menos 8 (oito) horas à bomba de vácuo ligada. Esse processo quando realizado de forma correta retorna no vacuômetro da bomba uma pressão interna de aproximadamente 9 mbar. Feito isso, foi necessário extremo cuidado no momento da separação do termossifão da bomba de vácuo. Para tal, uma pinça hemostática reta (*fórceps*) foi utilizada para interromper o processo de vácuo sendo presa na mangueira de polímero flexível. Podendo assim ser desligada a bomba de vácuo e finalizar esse processo desconectando todos componentes. O sistema para o procedimento de evacuação pode ser visto na Fotografia 5.

Fotografia 5 - Procedimento de evacuação



Fonte: Autoria própria.

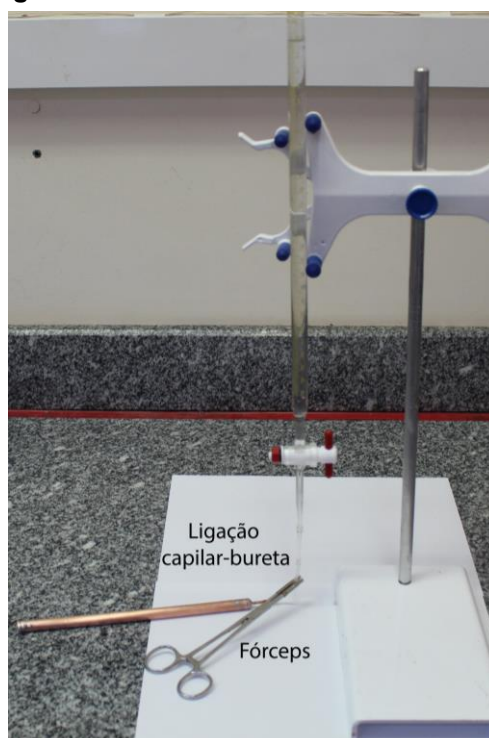
3.1.6 Preenchimento dos Termossifões

Para o preenchimento dos termossifões foi utilizada uma bancada de preenchimento. Sendo necessário um suporte universal com garra, uma bureta

graduada *Global Glass™*, com escala de 0,1mL e capacidade de até 25mL, uma seringa e uma pinça hemostática reta.

A bureta foi preenchida com a água destilada com o auxílio de uma seringa para evitar a formação de bolhas. O termossifão evacuado, com o *fórceps* ainda preso, foi conectado à bureta através da mangueira de polímero flexível (Fotografia 6). Entretanto, antes dessa conexão foi utilizado uma seringa para injetar o fluido de trabalho na mangueira, de modo a evitar a entrada de ar no dispositivo.

Fotografia 6 - Preenchimento dos termossifões



Fonte: Autoria própria.

O termossifão estando conectado à bureta foi preenchido com a razão de preenchimento desejada administrando a válvula de abertura da mesma, assim como pelo controle do *fórceps*. O preenchimento dos termossifões com água destilada variou entre 20% (0,57mL), 40% (1,13mL) e 60% (1,70mL). Os valores entre parênteses correspondem à quantidade de fluido de trabalho inserida nos termossifões. A razão de preenchimento consiste na razão entre o volume de fluido de trabalho e o volume do evaporador do termossifão.

Após o preenchimento com a quantidade de fluido de trabalho desejada, o capilar foi conformado e brasado utilizando um alicate de pressão a fim de evitar a entrada de ar no termossifão – Fotografia 7. A construção sendo concluída, os dispositivos passivos de transferência de calor então foram submetidos a um teste

preliminar. Aplicando calor na região do evaporador foi analisando o comportamento da distribuição de temperatura ao longo do termossifão, sendo que se o dispositivo apresentasse uma distribuição estável, com a região do evaporador atingindo temperaturas mais altas, a região do condensador atingindo temperaturas mais baixas, e a região adiabática atingir temperaturas entre as outras regiões, o mesmo era aprovado. Caso essas características não fossem atendidas o dispositivo seria reprovado e precisaria ser refeito seguindo os procedimentos descritos anteriormente.

Fotografia 7 - Brasagem do capilar



Fonte: Autoria própria.

3.2 SELEÇÃO DO TERMOSSIFÃO

Para selecionar a melhor configuração para o termossifão foram utilizados aparato e procedimento experimentais descritos a seguir. Essa metodologia foi baseada em Antonini Alves *et al.* (2018).

3.2.1 Aparato Experimental

O aparato experimental, mostrado na Fotografia 8, foi composto por um ventilador, uma fonte de alimentação *Keysight™* E36232A, um sistema de aquisição de dados *Keysight™* DAQ970A com um multiplexador de 20 canais, um computador *Dell™*, um *nobreak* e um suporte universal com garras.

Fotografia 8 - Aparato experimental



Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Instrumentação do Termossifão

O termossifão necessita passar uma instrumentação para obtenção dos dados experimentais. Primeiramente uma fita termossensível *Kapton™* foi colada na superfície do termossifão. Posteriormente uma resistência elétrica *Omega Engineering™* de liga níquel-cromo (80/20) foi enrolada na região do evaporador para que essa região do termossifão seja aquecida por meio do Efeito *Joule* e converta a energia elétrica em energia térmica na forma de calor.

Para aquisição das temperaturas, sensores de temperaturas foram dispostos ao longo do comprimento do termossifão – Fotografia 9. Foram utilizados termopares *Omega Engineering™* do tipo K, que são compostos por dois metais diferentes (cromel e alumel) e funcionam através do Efeito *Seebeck*. Para cada

termossifão foram utilizados 5 termopares dispostos da seguinte maneira: dois termopares igualmente espaçados na região do evaporador, dois termopares igualmente espaçados na região do condensador e um termopar no centro da seção adiabática. Ainda, para fixação dos termopares no termossifão foi adicionada um pouco de pasta térmica na ponta do termopar antes dos mesmos serem firmados nos termossifões.

Fotografia 9 - Termossifão instrumentado



Fonte: Autoria própria.

Para concluir a instrumentação, uma camada de lã de vidro e um tubo esponjoso blindado foram utilizados para isolar a região do evaporador e a seção adiabática. Esse isolamento térmico foi necessário para garantir que o fluxo térmico gerado pela resistência elétrica seja direcionado apenas ao evaporador, evitando perdas térmicas para o ambiente.

3.2.3 Procedimento Experimental

O procedimento experimental para seleção dos termossifões consiste inicialmente em, determinar a velocidade do escoamento de ar atmosférico proveniente do ventilador axial. Para tal, foi utilizado um termoanemômetro digital portátil *ITANTM 720*, de modo a garantir que a região do condensador esteja submetida a uma convecção forçada de 5m/s. O ajuste da temperatura ambiente do laboratório em $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ocorreu o auxílio de um ar condicionado *RheemTM*.

Cargas térmicas de 1W a 11W foram aplicadas na região do evaporador em incrementos de 2W e após o sistema atingir um regime *quasi* permanente o mesmo foi mantido nessas condições operacionais por 900 segundos. A aquisição de dados

foi feita utilizando o software *Keysight™ BenchVue 2020*, com um intervalo de 10 segundos entre cada coleta dos dados de temperatura.

3.2.4 Testes Experimentais

Inicialmente, o procedimento experimental mencionado foi executado para determinação da melhor razão de preenchimento de um termossifão aplicado em pré-aquecedores de ar. Para determinação da quantidade de fluido a ser utilizado como fluido de trabalho nos termossifões foi calculada uma razão de preenchimento, como apresentado na Equação (1). Para cada uma das razões de preenchimento 20% (0,57mL), 40% (1,13mL) e 60% (1,70mL) foram realizados testes experimentais em triplicata considerando uma inclinação de operação de 45° em relação à horizontal.

$$RP = \frac{V_l}{A_c l_{evap}} 100 \quad (1)$$

Sendo, V_l é o volume de fluido de trabalho, A_c é a área da seção transversal considerado o diâmetro interno dos termossifões e l_{evap} é o comprimento do evaporador dos termossifões.

Os dados da distribuição de temperaturas ao longo do comprimento dos termossifões em função do tempo para cada carga térmica aplicada, a temperatura operacional (T_{op}) e a resistência térmica (R_{th}) foram utilizados para análise do desempenho térmico dos termossifões. A resistência térmica foi obtida através da razão entre diferença das temperaturas médias entre as regiões do evaporador e condensador e a carga térmica aplicada (q_{in}) no termossifão:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{q_{in}} = \frac{T_{evap} - T_{cond}}{q_{in}}, \quad (2)$$

Sendo que, T_{evap} é a temperatura média da parede do evaporador e T_{cond} é a temperatura média da parede do condensador.

Selecionada a melhor razão de preenchimento, testes experimentais adicionais foram executados com esse termossifão escolhido visando encontrar a melhor inclinação de operação. Para tal, foi utilizado um transferidor de ângulo (goniômetro) *Worker™* para ajustar o termossifão em inclinações de operação de

22,5°, 45°, 67,5° e 90° em relação à horizontal. Esses testes experimentalmente foram executados sob as mesmas condições de dissipação de calor no evaporador e em triplicata. Posteriormente foi feita a mesma análise de desempenho térmico para determinar a melhor inclinação operacional do termostato para ser aplicado em um sistema de pré-aquecedor de ar.

3.2.5 Análise de Incertezas Experimentais

Medições experimentais resultam em uma incerteza de medição, assim estimar o grau de dúvida associado ao resultado de medição faz-se necessário (PEDOTT, 2012).

Para realizar a propagação das incertezas experimentais nesse Trabalho de Conclusão de Curso, foi utilizado o *software Engineering Equation Solver™ (EES™)*, e o método de incerteza que tem como princípio a combinação de incerteza com a grandeza relacionada (HOLMAN, 2011). Para o cálculo da propagação de incertezas experimentais foi utilizada a Equação (3), que de acordo com Taylor e Kuyatt (1994) propuseram, a incerteza ΔR de um resultado $R = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ com medidas em x_1, x_2, \dots, x_n pode ser expressa por:

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2}. \quad (3)$$

Ademais, com auxílio de fichas técnicas e catálogos fornecidos por fabricantes, informações da literatura e outros materiais complementares, foram estabelecidos os valores de incerteza experimental para as variáveis utilizadas nesse estudo, apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Incertezas Experimentais

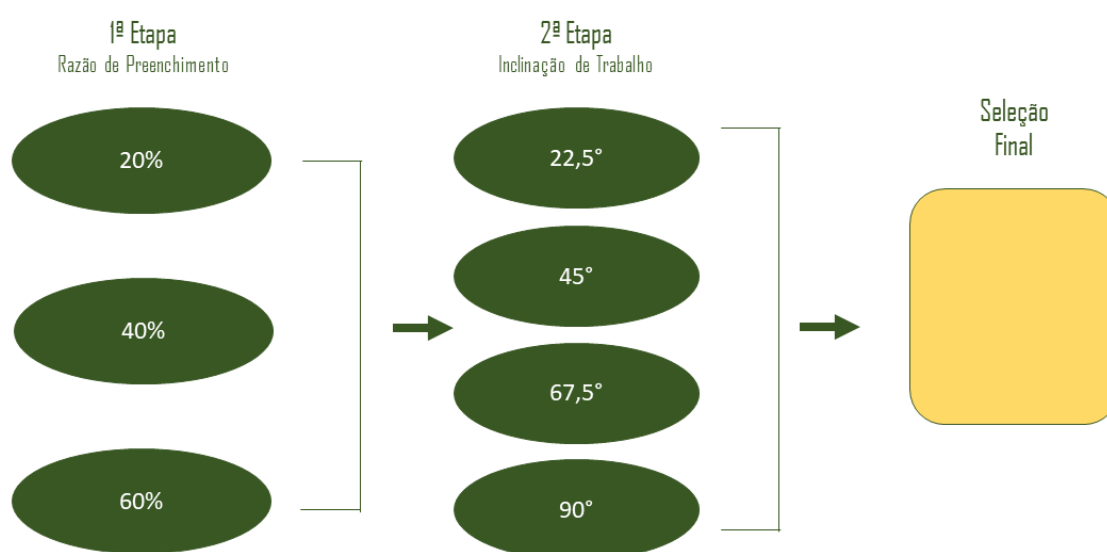
Parâmetro	Instrumento de Medição	Incerteza	Unidade
Comprimento	Escala milimetrada	±0,5	mm
Diâmetro	Paquímetro	±0,025	mm
Potência	Fonte de Alimentação	±1%	W
Temperatura	Termopar do tipo K	±0,25	°C
Velocidade	Termoanemômetro	±2%	m/s
Ângulo	Goniômetro	±0,5	°

Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos na seleção da melhor configuração de uma termossifão a ser utilizado em pré-aquecedores de ar. O desenvolvimento desse Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica segue o procedimento experimental proposto no fluxograma de atividades ilustrado esquematicamente na Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma das atividades da análise experimental



Fonte: Autoria própria.

Como mencionado anteriormente, primeiramente foi executada uma investigação experimental do desempenho térmico dos termossifões considerando diferentes razões de preenchimento com água destilada e inclinação de operação de 45°. Para tal, foram analisadas as razões de preenchimento de 20%, 40% e 60%, mediante o comportamento da distribuição de temperaturas ao longo do comprimento dos termossifões, da temperatura operacional e da resistência térmica. Posteriormente, após obtenção da melhor razão de preenchimento, foi realizado um estudo experimental para determinação da melhor inclinação de trabalho do termossifão selecionado. As inclinações operacionais analisadas em relação a horizontal, foram de 22,5°, 45°, 67,5° e 90° (posição vertical). De maneira similar foram analisados os mesmos parâmetros térmicos para determinação da melhor inclinação de operação.

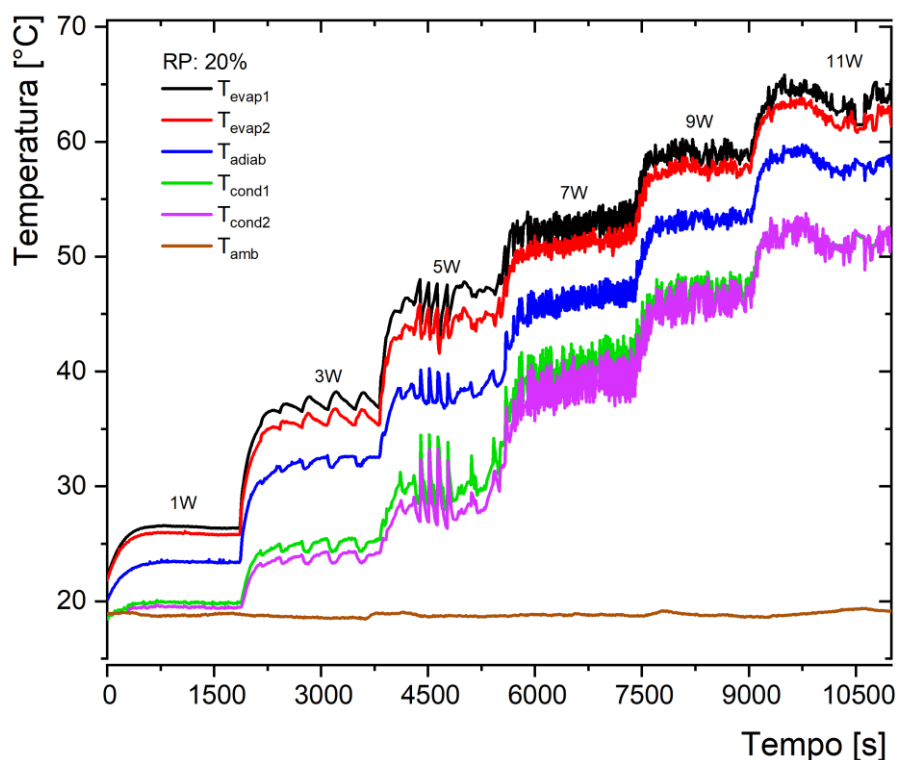
4.1 INFLUÊNCIA DA RAZÃO DE PREENCHIMENTO

A etapa inicial dessa investigação experimental consiste na avaliação da influência da razão de preenchimento 20%, 40% e 60%, no desempenho térmico dos termossifões contendo água destilada como fluido de trabalho sob diferentes cargas térmicas de 1W até 11W.

4.1.1 Razão de Preenchimento de 20%

O Gráfico 1 apresenta o comportamento da distribuição de temperaturas ao longo do termossifão com razão de preenchimento de 20% em função do tempo. Pode ser notado que a distribuição de temperaturas apresentou maiores magnitudes na região do evaporador seguidas pela seção adiabática e por fim, no condensador. Pode ser observado ainda algumas instabilidades decorrentes do desequilíbrio entre a quantidade de fluido de trabalho que é condensado e o fluido de trabalho evaporador.

Gráfico 1 - Distribuição de temperaturas no termossifão com razão de preenchimento de 20%

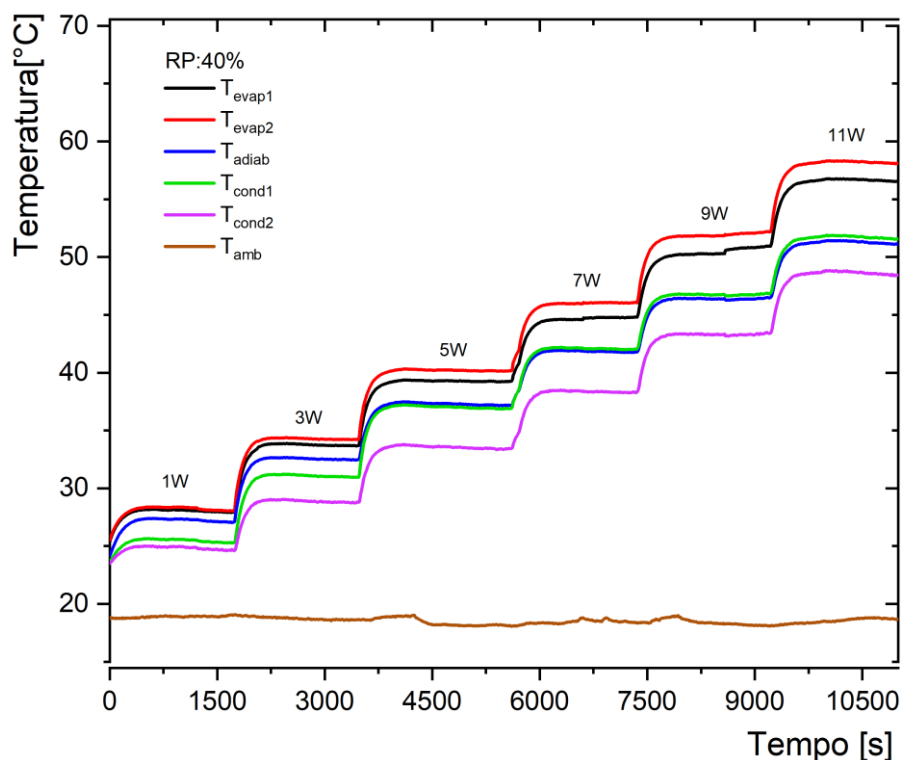


Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Razão de Preenchimento de 40%

O Gráfico 2 apresenta o comportamento da distribuição de temperaturas ao longo do termostifão com razão de preenchimento de 40% em função do tempo. Pode ser notado que a distribuição de temperatura apresentou maiores magnitudes na região do evaporador seguidas pela seção adiabática e a região do condensador. Esse é comportamento esperado para termostifões operando satisfatoriamente. Ainda, quando comparado com o comportamento do termostifão com razão de preenchimento de 20%, os valores das temperaturas operacionais apresentaram resultados menores, indicando que a quantidade de fluido de trabalho está apropriada para que o ciclo bifásico ocorra adequadamente.

Gráfico 2 - Distribuição de temperaturas no termostifão com razão de preenchimento de 40%



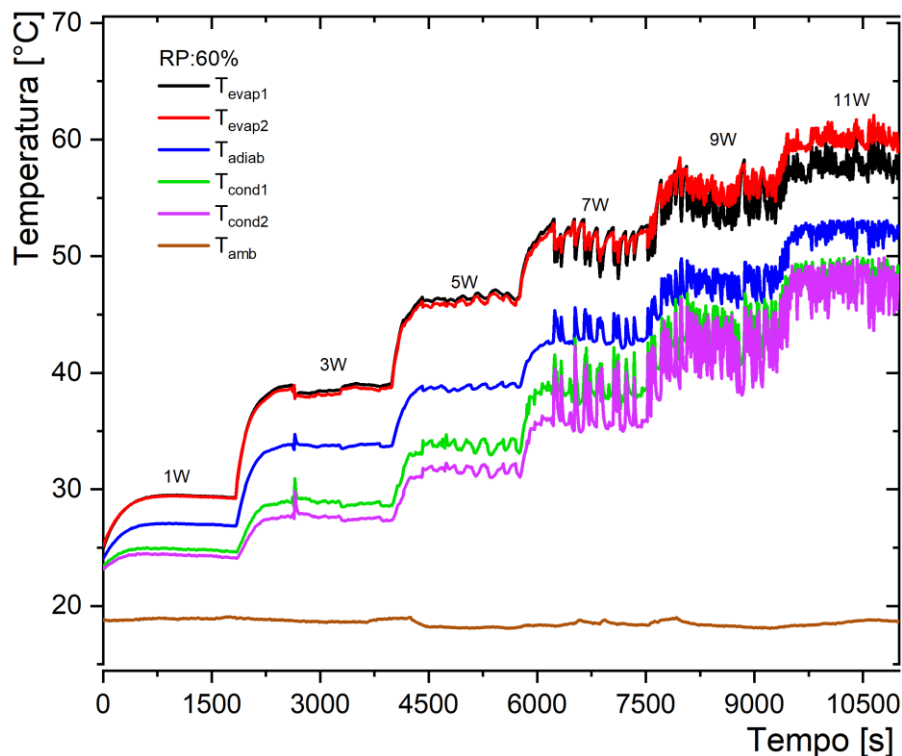
Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Razão de Preenchimento de 60%

O Gráfico 3 apresenta o comportamento da distribuição de temperaturas ao longo do comprimento do termostifão com razão de preenchimento de 60% em função do tempo. Como esperado, a distribuição de temperaturas apresentou maiores magnitudes no evaporador seguidas pela seção adiabática e por fim, no

condensador. Ainda, quando comparado com os comportamentos para os termosifões com razões de preenchimento de 20% e 40%, o comportamento do termosifão com razão de preenchimento de 60% apresentou semelhanças ao termosifão com razão de preenchimento de 20%, visto as instabilidades apresentadas em cargas térmicas superiores a 1W.

Gráfico 3 - Distribuição de temperaturas no termosifão com razão de preenchimento de 60%

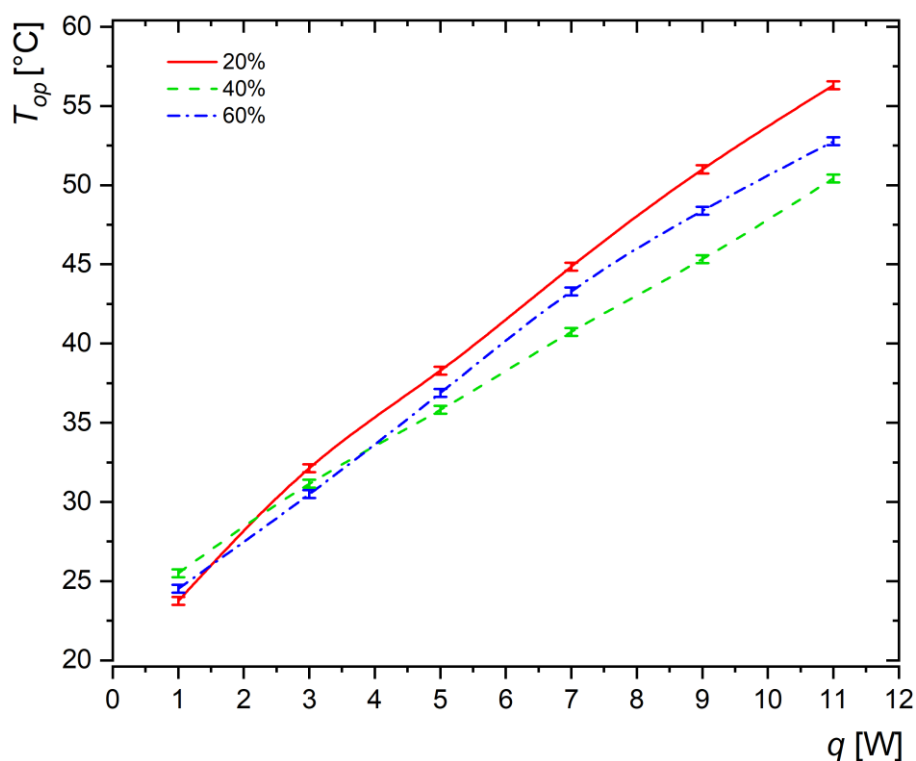


Fonte: Autoria própria.

4.1.4 Temperatura Operacional para Diferentes Razões de Preenchimento

O Gráfico 4 e a Tabela 5 mostram o comportamento da temperatura de operação em função da carga térmica aplicada nos termosifões considerando as razões de preenchimento de 20%, 40% e 60%. Ressalta-se que nesse estudo, a temperatura de operação (T_{op}) foi considerada a temperatura da seção adiabática (T_{adiab}) alcançada durante os testes experimentais. As incertezas experimentais também são apresentadas nos resultados.

Gráfico 4 - Temperatura operacional em função da carga térmica para diferentes razões de preenchimento



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 5 - Temperatura operacional [°C] em função da carga térmica para diferentes razões de preenchimento

Carga Térmica [W]	Razão de Preenchimento		
	20%	40%	60%
1	23,76 ± 0,25	25,50 ± 0,25	24,52 ± 0,25
3	32,13 ± 0,25	31,15 ± 0,25	30,49 ± 0,25
5	38,29 ± 0,25	35,82 ± 0,25	36,88 ± 0,25
7	44,86 ± 0,25	40,74 ± 0,25	43,30 ± 0,25
9	51,00 ± 0,25	45,33 ± 0,25	48,37 ± 0,25
11	56,31 ± 0,25	50,42 ± 0,25	52,76 ± 0,25

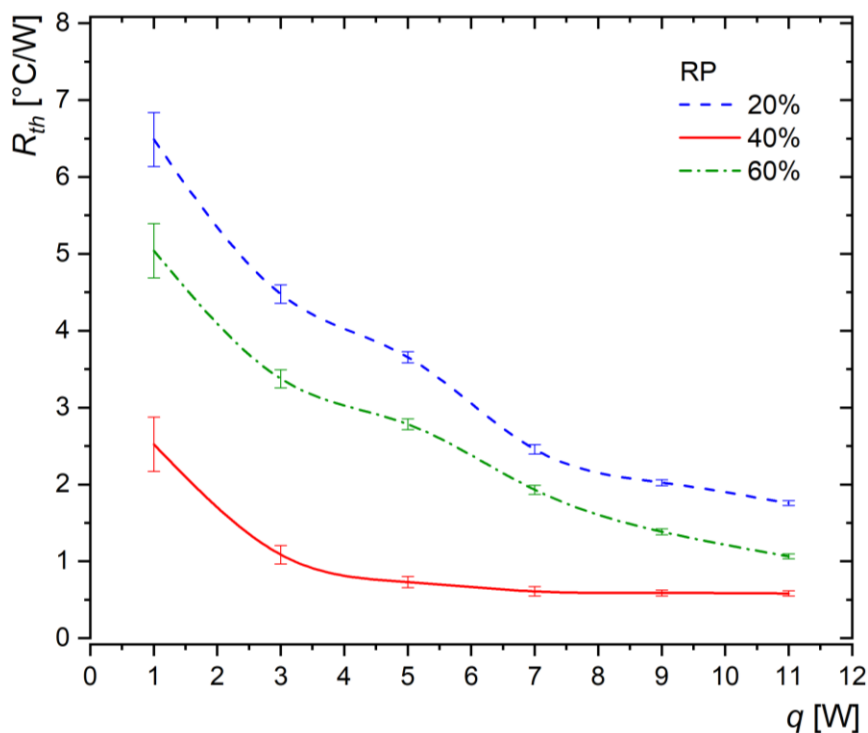
Fonte: Autoria Própria.

Pode ser observado, independentemente da razão de preenchimento do termosifão, a temperatura de operação aumenta com o aumento da carga térmica aplicada no evaporador. De uma forma geral, o termosifão com razão de preenchimento de 40% apresentou os menores valores de temperatura operacional para cada diferente dissipação de calor. Quando comparada, a temperatura operacional do termosifão com razão de preenchimento de 40% é aproximadamente 7% menor do que a do termosifão com RP 20% e de aproximadamente 3% menor quando comparado com o termosifão com razão de preenchimento de 60%.

4.1.5 Resistência Térmica para Diferentes Razões de Preenchimento

O Gráfico 5 e a Tabela 6 mostram o comportamento da resistência térmica dos termossifões em função da carga térmica aplicada considerando as razões de preenchimentos de 20%, 40% e 60%. Independentemente da razão de preenchimento do termossifão analisado, a resistência térmica diminui com o aumento da dissipação de potência no evaporador. As incertezas experimentais também foram apresentadas.

Gráfico 5 - Resistência térmica em função da carga térmica para diferentes razões de preenchimento



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 6 - Resistência térmica [°C/W] em função da carga térmica para diferentes razões de preenchimento

Carga Térmica [W]	Razão de Preenchimento		
	20%	40%	60%
1	6,49 ± 0,35	2,52 ± 0,35	5,04 ± 0,35
3	4,48 ± 0,12	1,08 ± 0,12	3,37 ± 0,12
5	3,66 ± 0,07	0,73 ± 0,07	2,78 ± 0,07
7	2,45 ± 0,06	0,61 ± 0,06	1,93 ± 0,06
9	2,02 ± 0,04	0,59 ± 0,04	1,38 ± 0,04
11	1,76 ± 0,03	0,58 ± 0,03	1,06 ± 0,03

Fonte: Autoria Própria.

Pode ser observado que independentemente da carga térmica aplicada no evaporador, o termossifão com razão de preenchimento de 40% apresenta as menores resistências térmicas. Quando comparado com o termossifão com razão de preenchimento de 20%, a resistência térmica é de aproximadamente 70% menor e de 60% menor quando comparado com termossifão com razão de preenchimento de 60%. Dessa forma, a razão de preenchimento de 40% foi a selecionada como a melhor para o termossifão contendo água destilada como fluido de trabalho que será aplicado em pré-aquecedores de ar.

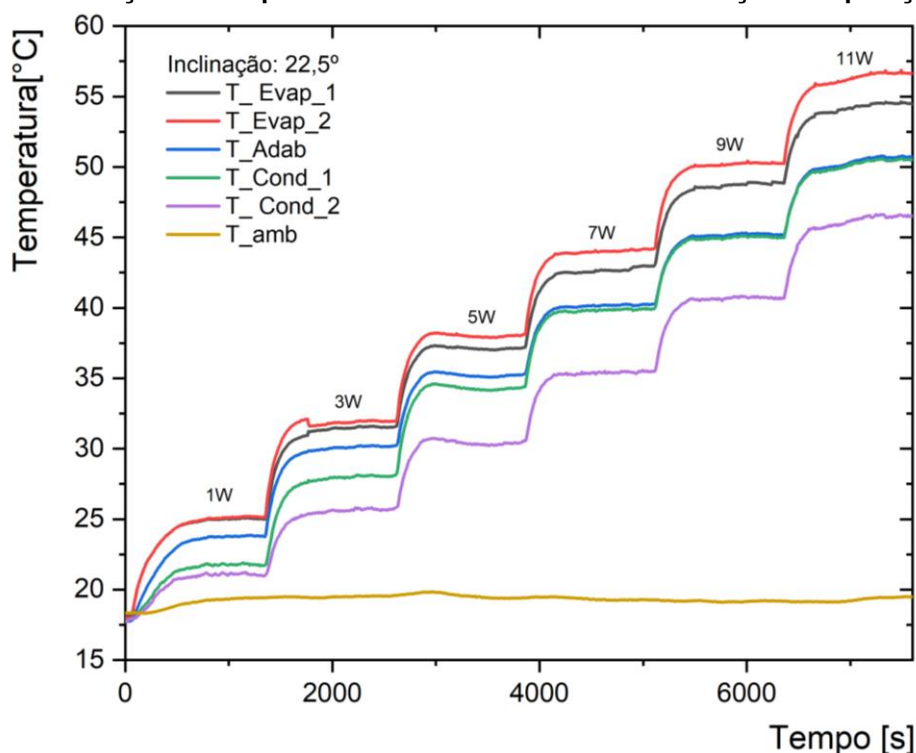
4.2 INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DE OPERAÇÃO

Nessa segunda etapa da investigação experimental foi realizada a avaliação da influência da inclinação de operação, considerando as inclinações de 22,5°, 45°, 67,5° e 90° em relação à horizontal, no desempenho térmico dos termossifões com razão de preenchimento de 40% sob diferentes cargas térmicas de 1W até 11W.

4.2.1 Inclinação de Operação de 22,5°

O Gráfico 6 apresenta o comportamento da distribuição de temperaturas ao longo do termossifão em função do tempo considerando uma inclinação de operação de 22,5° em relação à posição horizontal. Pode ser notado que a distribuição de temperatura apresentou maiores magnitudes na região do evaporador seguidas pela seção adiabática e região do condensador. Como esperado, as temperaturas alcançadas pelo termossifão testado aumentam com o aumento da carga térmica dissipada em seu evaporador.

Gráfico 6 - Distribuição de temperaturas no termostifão com inclinação de operação de 22,5°

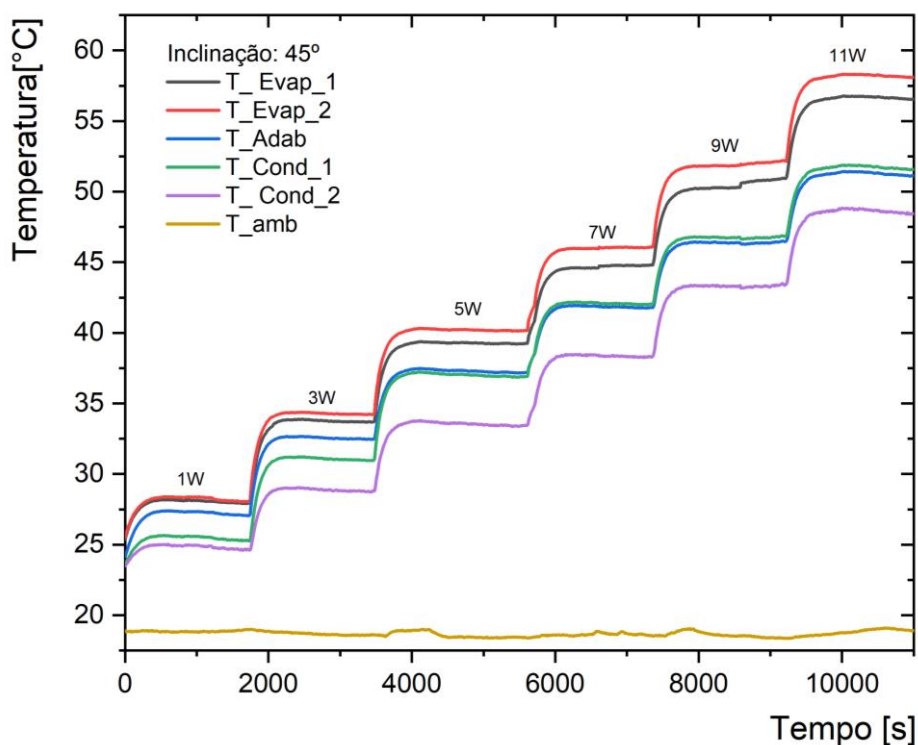


Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Inclinação de Operação de 45°

O Gráfico 7 apresenta o comportamento da distribuição de temperaturas ao longo do dispositivo passivo em função do tempo considerando uma inclinação de operação de 45°. Pode ser observado que a distribuição de temperaturas apresentou maiores magnitudes no evaporador, valores intermediários na seção adiabática e menores magnitudes na região do condensador. Quando comparado com os resultados experimentais para a inclinação de operação de 22,5°, esses valores de temperaturas apresentaram resultados próximos.

Gráfico 7 - Distribuição de temperaturas no termossifão com inclinação de operação de 45°

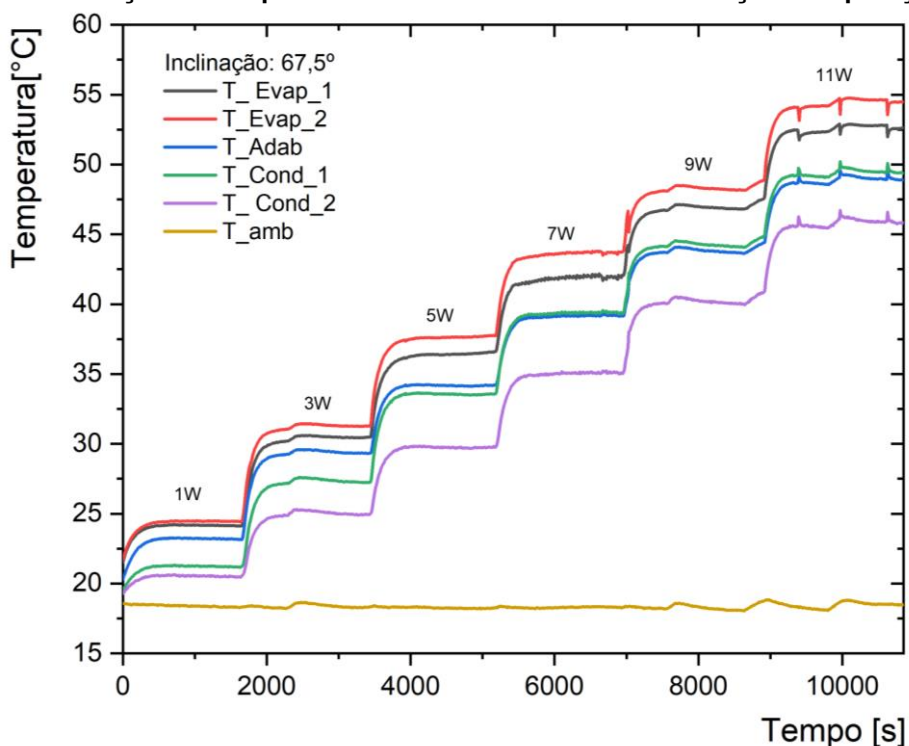


Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Inclinação de Operação de 67,5°

O Gráfico 8 apresenta o comportamento da distribuição de temperaturas ao longo do comprimento do termossifão em função do tempo considerando uma inclinação de operação de 67,5°. Como esperado para um termossifão funcionando corretamente, pode ser notado que a distribuição de temperaturas apresentou maiores magnitudes na região do evaporador seguidas pela seção adiabática e pela na região do condensador, respectivamente. Ainda, quando comparado com os resultados encontrados para as inclinações de operação de 22,5° e 45°, as magnitudes das temperaturas apresentaram resultados próximos.

Gráfico 8 - Distribuição de temperaturas no termostifão com inclinação de operação de 67,5°

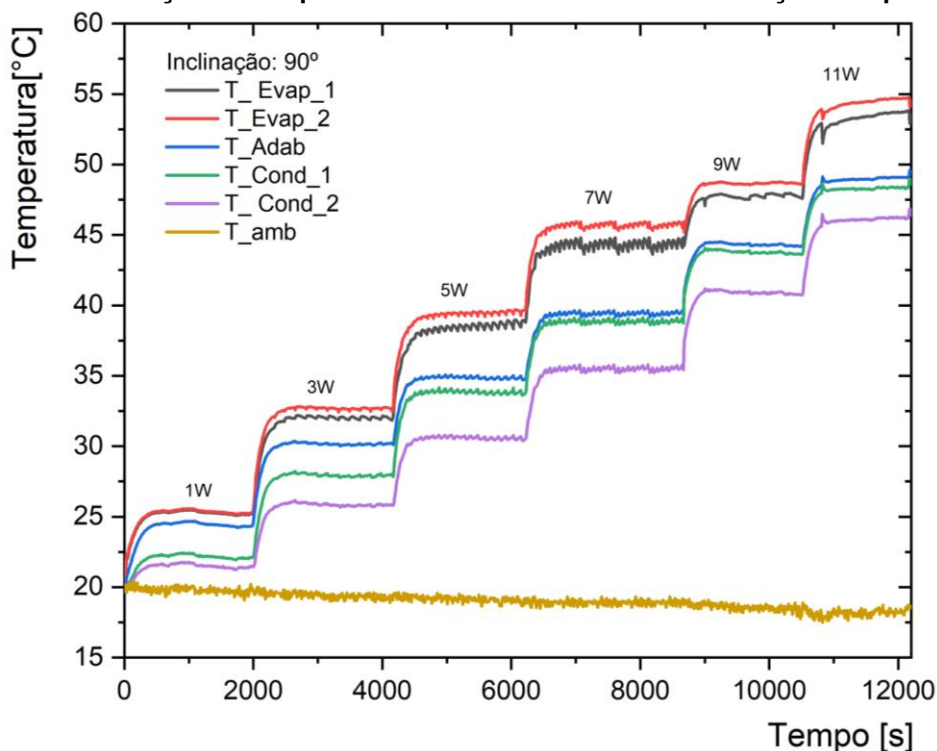


Fonte: Autoria própria.

4.2.4 Inclinação de Operação de 90°

O Gráfico 9 apresenta o comportamento da distribuição de temperaturas ao longo do comprimento do termostifão em função do tempo considerando a posição de trabalho na vertical (inclinação de operação de 90°). Novamente, pode ser notado que a distribuição de temperaturas durante a execução dos testes experimentais apresentou maiores magnitudes na região do evaporador, magnitudes intermediárias na seção adiabática e menores magnitudes no condensador. Ainda, quando comparado com os resultados encontrados para as inclinações de operação de 22,5°, 45° e 67,5°, as magnitudes das temperaturas na posição vertical apresentaram resultados próximos.

Gráfico 9 - Distribuição de temperaturas no termossifão com inclinação de operação 90°

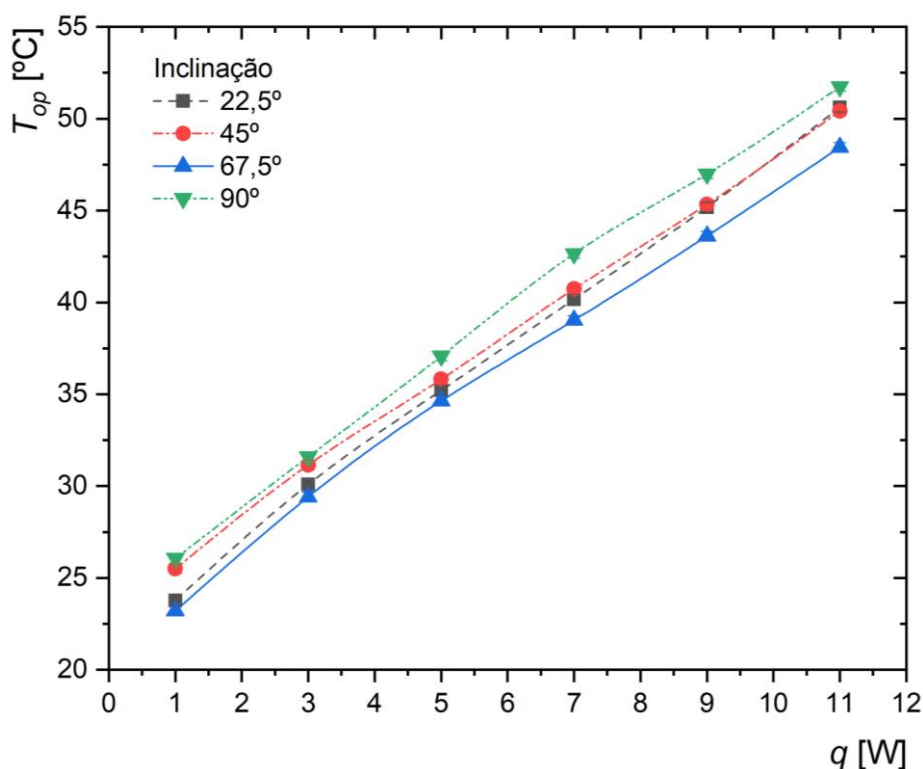


Fonte: Autoria própria.

4.2.5 Temperatura Operacional para Diferentes Inclinações de Operação

O Gráfico 10 e a Tabela 7 apresentam o comportamento da temperatura operacional do termossifão em função da carga térmica aplicada considerando as inclinações de operação de 22,5°, 45°, 67,5° e 90° em relação à horizontal. Independentemente da potência dissipada no evaporador do termossifão, à medida que essa carga térmica foi aumentada, a temperatura operacional também aumentou. Na comparação entre os resultados experimentais da temperatura operacional, os resultados para a posição vertical (inclinação de operação de 90°) apresentaram as maiores magnitudes enquanto os resultados para a inclinação de operação de 67,5° as menores. Ressalta-se novamente que, para esse trabalho, a temperatura de operação do termossifão foi considerada como sendo a temperatura da seção adiabática encontrada durante a execução dos testes experimentais.

Gráfico 10 - Temperatura operacional em função da carga térmica para diferentes inclinações de operação



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 7 - Temperatura operacional [°C] em função da carga térmica para diferentes inclinações de operação

Carga Térmica [W]	Inclinação de Operação			
	22,5°	45°	67,5°	90°
1	23,78 ± 0,25	25,50 ± 0,25	23,03 ± 0,25	26,06 ± 0,25
3	31,09 ± 0,25	31,15 ± 0,25	29,40 ± 0,25	31,60 ± 0,25
5	35,22 ± 0,25	35,82 ± 0,25	34,44 ± 0,25	37,08 ± 0,25
7	40,17 ± 0,25	40,74 ± 0,25	39,31 ± 0,25	42,65 ± 0,25
9	45,19 ± 0,25	45,33 ± 0,25	44,54 ± 0,25	46,99 ± 0,25
11	50,62 ± 0,25	50,42 ± 0,25	48,87 ± 0,25	51,74 ± 0,25

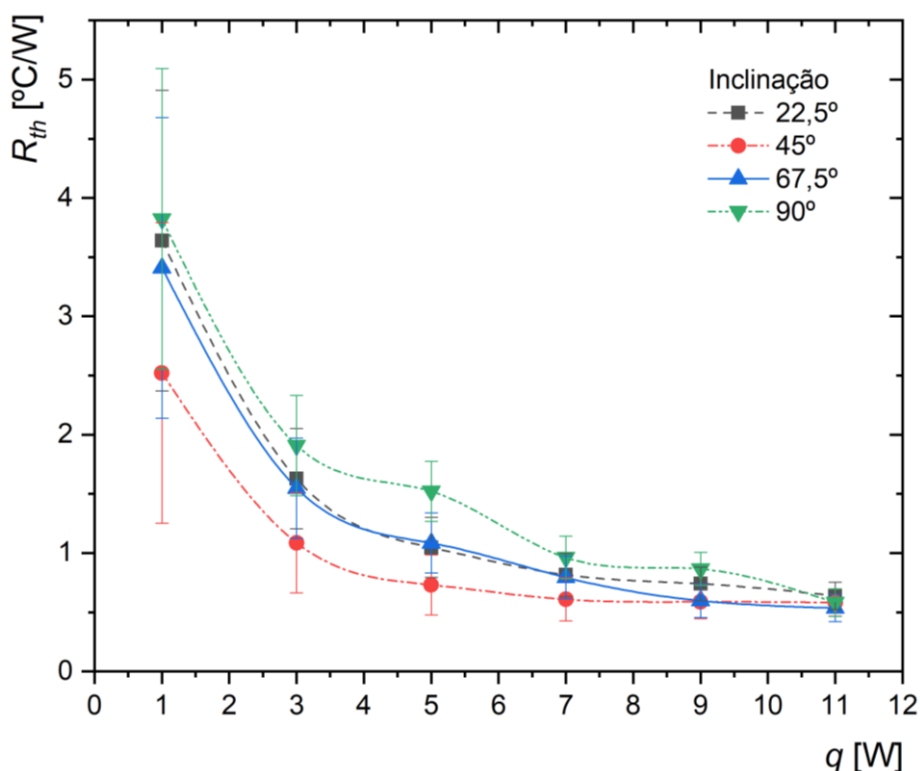
Fonte: Autoria Própria.

4.2.6 Resistência Térmica para Diferentes Inclinações de Operação

O Gráfico 11 e a Tabela 8 mostram o comportamento da resistência térmica do termossifão em relação à carga térmica dissipada no evaporador considerando as inclinações de operação de 22,5°, 45°, 67,5° e 90°. Pode ser observado que, independentemente da quantidade de potência dissipada no evaporador do termossifão, a medida que essa carga térmica foi aumentada, a resistência térmica

diminuiu. Quando comparado com os resultados das demais inclinações de operação, a inclinação de operação de 45° apresentou a menor resistência térmica na maioria dos casos. Dessa forma, a partir dessa comparação, a inclinação de operação de 45° foi a selecionada para os futuros testes experimentais envolvendo um pré-aquecedor de ar assistido por termossifões.

Gráfico 11 - Resistência térmica em função da carga térmica para diferentes inclinações de operação



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 8 - Resistência térmica em função da carga térmica para diferentes inclinações de operação

Carga Térmica [W]	Inclinação de Operação			
	22,5°	45°	67,5°	90°
1	3,64 ± 1,27	2,52 ± 1,27	3,41 ± 1,27	3,82 ± 1,27
3	1,63 ± 0,42	1,08 ± 0,42	1,55 ± 0,42	1,91 ± 0,42
5	1,05 ± 0,25	0,73 ± 0,25	1,09 ± 0,25	1,52 ± 0,25
7	0,82 ± 0,18	0,61 ± 0,18	0,79 ± 0,18	0,96 ± 0,18
9	0,74 ± 0,14	0,59 ± 0,14	0,60 ± 0,14	0,87 ± 0,14
11	0,64 ± 0,12	0,58 ± 0,12	0,54 ± 0,12	0,58 ± 0,12

Fonte: Autoria Própria.

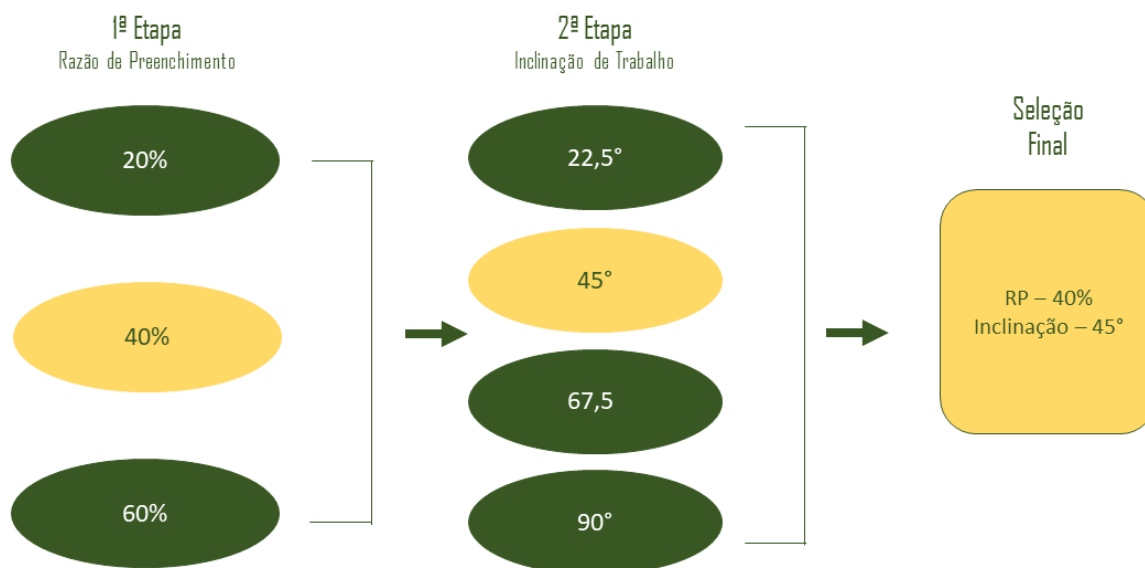
5 CONCLUSÃO

Neste Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica foi executada uma investigação experimental do desempenho térmico de um termossifão contendo água destilada como fluido de trabalho considerando diferentes razões de preenchimento e inclinações de operação para aplicação em pré-aquecedores de ar.

Para a realização deste estudo experimental, foram construídos termossifões de tubos de cobre com comprimento total de 180mm, diâmetro externo de 9,45mm e diâmetro interno de 7,75mm. As regiões do evaporador, seção adiabática e condensador tiveram o mesmo comprimento, 60mm. O evaporador foi aquecido por uma fita resistiva de níquel-cromo e o condensador foi resfriado por convecção forçada a ar. A carga térmica fornecida ao termossifão foi de 1W até 11W com incrementos de 2W.

Na primeira etapa da seleção foram analisadas razões de preenchimento de 20%, 40% e 60% considerando uma inclinação de operação de 45° em relação à horizontal. Os melhores resultados experimentais encontrados foram para uma razão de preenchimento de 40%, que apresentou a menor temperatura operacional e menor resistência térmica. Na segunda etapa da seleção esses termossifões foram testados experimentalmente as inclinações de operação de 22,5°, 45°, 67,5° e 90° (posição vertical). A inclinação de operação selecionada foi de 45°, pois apresentou a menor resistência térmica. Um fluxograma das atividades experimentais executadas é apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma das atividades da análise experimental



Fonte: Autoria Própria.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, efetuar uma análise experimental considerando diferentes fluidos de trabalho no termossifão que será aplicado no trocadores de calor para recuperação de energia. Para isso, a nanotecnologia pode ser explorada como uma opção na escolha do fluido de trabalho, uma vez que as propriedades mecânicas e térmicas de nanofluidos costumam ser superiores quando comparadas à materiais convencionais, apresentando grande potencial no aumento da transferência de calor.

REFERÊNCIAS

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

CACUA, K. et al. "Nanofluids Stability Effect on a Thermosyphon Thermal Performance." **International Journal of Thermal Sciences** 153 (2020): 106347.

CAJAMARCA, S. P. A. **Análise teórica de trocadores de calor casco – casco termossifões**. 2016. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

CHI, S.W. **Heat Pipe Theory and Practice: A Sourcebook**. Washington, DC, USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1976.

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.

DIMBARRE, V. V. **Investigação Experimental do Comportamento Térmico de Termossifões Aplicados a Coletores Solares utilizando Nanofluido de Óxido de Grafeno**. 2021. 111f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

HOLMAN, J.P. **Experimental Methods for Engineers**, 6.ed., Singapore, Mcgrall-Hill, 2011.

HUMMERS, W. S.; OFFEMAN, R. E. **Preparation of Graphitic Oxide**. *Journal of the American Chemical Society*, ACS Publications, v. 80, n. 6, p. 1339–1339, 1958.

HUNG, T. C. et al. A study of organic working fluids on system efficiency of an ORC using low-grade energy sources. **Energy**, v. 35, n. 3, p. 1403–1411, 2010.

KAKAÇ, S; LIU, H; PRAMUANJAROENKIJ, A. **Heat exchangers: selection, rating and thermal design**. 3rd. ed. Boca Raton, US: CRC Press, 2012. 615 p. ISBN 9781439849903.

KRAMBECK, L. **Estudo Experimental do Desempenho Térmico de Estruturas Capilares de Pó de Cobre Sinterizado em Tubos de Calor**. 2018. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

LE, V. L. et al. Performance optimization of low-temperature power generation by supercritical ORCs (organic Rankine cycles) using low GWP (global warming potential) working fluids. **Energy**, v. 67, p. 513–526, abr. 2014. TCC_Recu_LE et al., 2014

MACHADO, P.L.O. **Sistema Híbrido Fotovoltaico/Térmico para Geração de Energia Elétrica e Aquecimento de Água Utilizando Termossifões**. 2022. 171p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2022.

MANTELLI, M.B.H. Notas de Aula: **Curso sobre Termossifões e Termossifões**. UFSC, Florianópolis, 2009.

MANTELLI, M.B.H. **Thermosyphons and heat pipes: theory and applications**. Cham, SWI: Springer, 2021.

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

PEDOTT, Alexandre. Notas de Aula: **Metrologia e Ensaio**. UFRGS, Porto Alegre, 2012.

PETERSON, G. P. **An introduction to heat pipes: modeling, testing and application**. New York, USA: John Wiley & Sons, 1994.

REMELI, Muhammad Fairuz Bin. **Simultaneous Industrial Waste Heat Recovery and Power Generation Using Heat Pipe Assisted Thermoelectric Generator**. 2016. 174 f. Tese (Doutorado) - Curso de Aerospace Mechanical And Manufacturing Engineering, Rmit University, Melbourne, 2015.

SAIDUR, R. et al. Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 8, p. 5649–5659, out. 2012.

SHABANY, Y. **Heat Transfer: Thermal Management of Electronics**. Boca Raton, FL USA: CRC Press, 2010.

SHABGARD, H. et al. "Thermal Characteristics of a Closed Thermosyphon under Various Filling Conditions." **International Journal of Heat and Mass Transfer** 70 (2014): 91-102.

STREMEL, G. K. **Avaliação experimental do desempenho térmico de termossifões com nanofluido como fluido de trabalho**. 2017. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

TAYLOR, B. N.; KUYATT, C. E. Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results. 1994.

WLAZLAK, A. et al. Influence of graphene oxide nanofluids and surfactant on thermal behaviour of the thermosyphon. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 136, n. 2, p. 843–855, ago. 2018.