

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VICTOR VAUREK DIMBARRE

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM AQUECEDOR DO TIPO RADIADOR
ASSISTIDO PELO PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE TERMOSSIFÕES**

PONTA GROSSA

2024

VICTOR VAUREK DIMBARRE

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM AQUECEDOR DO TIPO RADIADOR
ASSISTIDO PELO PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE TERMOSSIFÕES**

**EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A RADIATOR-TYPE HEATER ASSISTED BY
THERMOSYPHONS OPERATING PRINCIPLE**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves*

Coorientador: Prof. Dr. *Paulo Henrique Dias dos Santos*

PONTA GROSSA

2024



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

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



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa



VICTOR VAUREK DIMBARRE

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM AQUECEDOR DO TIPO RADIADOR ASSISTIDO PELO
PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE TERMOSSIFÕES**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado
como requisito para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de
concentração: Térmica e Fluidos

Data de aprovação: 10 de Abril de 2024.

Prof. Thiago Antonini Alves, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Jhon Jairo Ramirez Behainne, Doutorado - Universidade Federal do Paraná

Profa. Marcia Barbosa Henriques Mantelli, Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina
(UFSC)

Dedico este trabalho à minha família, pelos
momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão bem-sucedida da minha dissertação de mestrado.

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida e por sempre estar ao meu lado, diariamente me ensinando as mais diversas lições.

Gostaria de agradecer aos meus familiares, *Luiz, Lusiana, Daniel e Sofia*, que estiveram presentes nos mais variados momentos e pela compreensão constante.

Ao meu orientador, Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves*, expresso minha gratidão pela orientação constante, apoio incansável e valiosos *insights* ao longo deste processo. Sua orientação foi fundamental para o desenvolvimento desse trabalho e para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. *Paulo Henrique Dias dos Santos*, agradeço por sua contribuição à minha formação.

Sou grato aos amigos, *André Mayer, Carlos Diedrich, Douglas Vasconcellos, Felipe Mercês Biglia, Guilherme Bartmeyer, José Vinicius Nascimento, Larissa Krambeck, Luis Vítório, Pedro Machado*, e aos demais colegas do LabCT, pela troca de experiências, discussões, risadas, noites trabalhadas e apoio mútuo ao longo desta jornada acadêmica. Suas contribuições foram essenciais para o meu desenvolvimento pessoal e acadêmico.

Ao Prof. Dr. *Romeu Miqueias Szmoski*, agradeço pelas dicas, conselhos e pelo tempo e dedicação dedicados quando solicitado para a utilização de diferentes *softwares Open-Source* e a montagem de sistemas eletroeletrônicos.

Ao Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM) e ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Ponta Grossa.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pela oportunidade.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de bolsa de estudo.

Muito obrigado a todos que contribuíram de alguma forma para esse trabalho. Vocês têm minha sincera gratidão.

“Mas, sejam fortes e não desanimem, pois o
trabalho de vocês será recompensado.”
2 Crônicas 15:7

RESUMO

A eficiência térmica desempenha um papel crucial em diversas aplicações industriais e de engenharia, sendo um indicador fundamental para avaliar o desempenho desses sistemas. Os aquecedores do tipo radiador são conhecidos por sua característica compacta, permitindo grandes trocas térmicas em um volume reduzido. Os sistemas baseados no princípio de funcionamento de termossifões aproveitam o calor latente de vaporização de um fluido de trabalho em condição bifásica para transferir calor. Esse processo ocorre através da absorção de calor na região do evaporador, que é então transportado até a região do condensador, onde o fluido de trabalho se condensa e retorna ao evaporador, completando o ciclo termodinâmico. A eficiência térmica desses dispositivos passivos depende de vários parâmetros, incluindo as propriedades termofísicas do fluido de trabalho, a geometria do sistema e a diferença de temperatura entre as regiões quente e fria. No presente trabalho foi realizada uma análise experimental do funcionamento de dois aquecedores do tipo radiador. Um deles, aquecedor comercial, foi mantido como referência, utilizando óleo como fluido de trabalho; e no outro aquecedor, protótipo, foram feitas algumas alterações para seu funcionamento ser baseado no princípio de termossifões. Nesse protótipo foi utilizado água destilada como fluido de trabalho e preenchido com distintas razões de preenchimento (40%, 50% e 60%), para avaliar a distribuição de temperatura, a pressão de trabalho e o tempo necessário para atingir o regime permanente. Os resultados levam a conclusão de que o protótipo quando preenchido com razão de preenchimento de 40% apresenta as melhores características de otimização quando comparados aos demais, sendo 62% mais rápido no alcance da temperatura operacional, apresenta um gradiente térmico de 3°C enquanto o comercial de 15°C e, em contrapartida, apresenta uma temperatura máxima de 10°C abaixo do comercial. De forma geral, esse dispositivo apresenta-se como uma alternativa promissora em comparação com outros aquecedores, oferecendo um consumo energético equivalente para garantir o conforto térmico em ambientes domésticos.

Palavras-chave: aquecedor; termossifão; tubo de calor; análise experimental.

ABSTRACT

Thermal efficiency plays a crucial role in various industrial and engineering applications, serving as a fundamental indicator to assess the performance of these systems. Radiator-type heaters are known for their compact feature, allowing for large thermal exchanges in a reduced volume. Systems based on the thermosyphon operating principle harness the latent heat of vaporization of a working fluid in a two-phase condition to transfer heat. This process involves heat absorption in the evaporator region, which is then transported to the condenser region, where the working fluid condenses and returns to the evaporator, completing the thermodynamic cycle. The thermal efficiency of these passive devices depends on several parameters, including the thermophysical properties of the working fluid, system geometry, and the temperature difference between hot and cold regions. In this study, an experimental analysis of the operation of two heaters was conducted. One of them, a commercial heater, was kept as a reference, using oil as the working fluid; while in the other heater, prototype, some modifications were made to operate based on the thermosyphon principle. In the prototype, distilled water was used as the working fluid and filled with different filling ratios (40, 50, and 60%), to assess temperature distribution, working pressure, and the time required to reach steady-state conditions. The results lead to the conclusion that the prototype, when filled with a filling ratio of 40%, exhibits the best optimization characteristics compared to the others. It is 62% faster in reaching operational temperature, has a thermal gradient of 3°C compared to the commercial heater's 15°C, and conversely exhibits a maximum temperature 10°C lower than the commercial heater. Overall, this device proves to be a promising alternative compared to commercial heater, providing comparable energy consumption to ensure thermal comfort in household environments.

Keywords: heater; thermosyphon; heat pipe; experimental analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição das anomalias de temperatura no Brasil durante o inverno de 2021	18
Figura 2 - Exemplo de modelos de aquecedores domésticos	18
Figura 3 - Princípio de funcionamento do termossifão	22
Figura 4 - Distribuição da energia útil pelo tempo	25
Figura 5 - Trocador de calor em configuração alinhada.....	26
Figura 6 - Novo modelo de trocador de calor de tubos concêntricos	27
Figura 7 - Trocador de calor casca e casca	29
Figura 8 - Aquecedor do tipo radiador para avaliar o desempenho térmico e a estabilidade de nanofluidos	30
Figura 9 - Temperaturas de Regime permanente ao dissipar diferentes cargas térmicas utilizando nanofluidos de alumina como fluido de trabalho	30
Figura 10 - Tipos de termossifão	32
Figura 11 - Resultados do comparativo entre TPCT e CE-TPCT da razão de preenchimento pelo coeficiente de transferência de calor	33
Figura 12 - Diagrama do aquecedor elétrico.....	34
Figura 13 - Tubo de calor em <i>loop</i> delgado (LHP).....	35
Figura 14 - Aparato Experimental para avaliação de sistema de resfriamento passivo.....	36
Figura 15 - Novo modelo de termossifão em <i>loop</i> para teste com etanol.....	37
Figura 16 - Novo modelo de termossifão em <i>loop</i> para teste com etanol.....	38
Figura 17 - Aquecedor a óleo <i>Mondial</i> ® A-06	39
Figura 18 - Resistor elétrico de imersão	40
Figura 19 - Diagrama de fluxo do projeto e montagem do experimento	41
Figura 20 - Projeto preliminar do aquecedor do tipo radiador	42
Figura 21 - Diagrama esquemático do aparato experimental: aquecedor comercial.....	42
Figura 22 - Diagrama esquemático do aparato experimental: protótipo	43
Figura 23 - Representação esquemática do protótipo	46
Figura 24 - Representação esquemática do aquecedor comercial.....	46
Figura 25 - Imagens da câmera termográfica do radiador comercial em funcionamento.....	60
Figura 26 - Imagens termográficas no protótipo com razão de preenchimento de 40%.....	67

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Aparato experimental: aquecedores e bomba de vácuo.....	44
Fotografia 2 - Aparato experimental: visão geral	45
Fotografia 3 - Solda de termopares do tipo K.....	47
Fotografia 4 - Sistema de Aquisição de Potência.....	48
Fotografia 5 - Sistema de Gerenciamento de Potência.....	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição da quantidade de artigos publicados pelo ano de publicação.....	24
Gráfico 2 - Funcionamento do aquecedor comercial com convecção natural e fluido de trabalho óleo	56
Gráfico 3 - Distribuição de temperaturas para o aquecedor comercial em teste de 5 horas	58
Gráfico 4 - Diagrama <i>boxplot</i> da distribuição de temperaturas em regime permanente: aquecedor comercial	59
Gráfico 5 - Temperaturas e carga térmica em função do tempo para o protótipo aquecedor com 40% de fluido de trabalho.....	61
Gráfico 6 - Temperatura média em função da carga térmica para o protótipo 40%	62
Gráfico 7 - Pressão interna e carga térmica em função do tempo para o protótipo 40%	63
Gráfico 8 - Relação entre pressão interna e temperatura de saturação no protótipo 40%	64
Gráfico 9 - Distribuição de temperaturas em função do tempo para o protótipo com razão de preenchimento de 40%	65
Gráfico 10 - Distribuição de temperaturas em regime permanente para o protótipo 40%	66
Gráfico 11 - Distribuição de temperaturas para o protótipo com razão de preenchimento de 50%	69
Gráfico 12 - Distribuição de temperaturas para o protótipo com 50%	69
Gráfico 13 - Distribuição de temperaturas para o protótipo 60%.....	71
Gráfico 14 - Distribuição de temperaturas em regime permanente para o protótipo 60%	71
Gráfico 15 - Distribuição de temperaturas para as diferentes configurações ...	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cargas térmicas aplicadas nos aquecedores	52
Tabela 2 - Razões de Preenchimento para o protótipo	52
Tabela 3 - Incertezas experimentais	53
Tabela 4 - Temperaturas para diferentes cargas térmicas: aquecedor comercial	57
Tabela 5 - Temperaturas médias no protótipo considerando RP 40%	62
Tabela 6 - Comportamento da pressão interna no protótipo 40%	64
Tabela 7 - Temperatura média, pressão interna média e consumo do protótipo RP 40%	66
Tabela 8 - Dados regime permanente RP 50%	70
Tabela 9 - Dados regime permanente RP 60%	72
Tabela 10 - Dados de tempos dos aquecedores	73
Tabela 11 - Dados de temperatura média dos aquecedores	74
Tabela 12 - Avaliação da resistência térmica para os aquecedores	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CE-TPCT	Termossifão <i>closed-end</i>
DAMEC	Departamento Acadêmico de Mecânica
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LabCT	Laboratório de Controle Térmico
LHP	<i>Loop Heat Pipe</i>
PHP	<i>Pulsating Heat Pipe</i>
NPT	<i>National Pipe Thread</i>
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
RP	Razão de Preenchimento
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
TFA	Ácido trifluoroacético
TPCT	Termossifão convencional
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
PV/T	Fotovoltaico/térmico

LISTA DE SÍMBOLOS

R^2	Coeficiente de determinação
σ	Desvio padrão
ΔR	Incerteza de um resultado
$\bar{x}$	Média
μ	Média da população
N	Número total de observações na população
n	Quantidade de itens
x_i	Valor correspondente de cada item
RP	Razão de Preenchimento
$\bar{T}_e$	Temperatura Média do Evaporador
$\bar{T}_c$	Temperatura Média do Evaporador
R_t	Resistência Térmica Experimental

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa.....	19
1.2	Objetivos	19
1.3	Descrição da Dissertação de Mestrado	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Termossifão	21
2.2	Trocadores de Calor.....	23
2.3	Revisão Sistemática da Literatura	24
2.3.1	Estado da Arte.....	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Aparato experimental.....	39
3.1.1	Descritivo de funcionamento de trocadores de calor do tipo radiador	39
3.1.2	Projeto e montagem do protótipo do aquecedor	41
3.1.3	Sistema de aquisição de dados	44
3.1.4	Fabricação e calibração dos termopares.....	47
3.1.5	Desenvolvimento do sistema de aquisição de potência	48
3.1.6	Sistema de gerenciamento automático de potência	49
3.2	Procedimento experimental.....	50
3.2.1	Limpeza e preparo do protótipo do aquecedor	50
3.2.2	Metodologia dos testes experimentais	51
3.2.3	Avaliação da Resistência Térmica.....	53
3.3	Análise de incertezas experimentais	53
3.4	Tratamento estatístico	53
3.4.1	Média.....	54
3.4.2	Desvio padrão	54
3.4.3	Coeficiente de Determinação - R^2	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1	Aquecedor comercial	56
4.2	Protótipo do aquecedor assistido pelo princípio de funcionamento de termossifões	60
4.2.1	Razão de Preenchimento de 40%	61
4.2.2	Razão de Preenchimento de 50%	68

4.2.3	Razão de Preenchimento de 60%	70
4.2.4	Comparativo entre os aquecedores.....	72
5	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS.....	77
	APÊNDICE A - Projeto e Montagem do Protótipo do Aquecedor do Tipo Radiador utilizando o Princípio de Funcionamento de Termossifões	80
	APÊNDICE B - Ajuste de Curva/Calibração dos Termopares do Tipo K	84
	APÊNDICE C - Desenvolvimento do Sistema de Aquisição de Potência	90
	ANEXO A - Certificado de Calibração: Transdutor de Pressão OmegaEngineering® PXM309	93

1 INTRODUÇÃO

A definição de conforto térmico, conforme descrito por Lamberts (2016), refere-se ao estado psicológico que reflete a satisfação do indivíduo com o ambiente circundante. Isso pode ser compreendido como uma sensação agradável ou desagradável, associada ao calor ou ao frio, manifestando-se quando ocorre um desequilíbrio térmico excessivo, isto é, quando há uma disparidade entre o calor gerado pelo corpo e o calor dissipado para o ambiente.

As variáveis climáticas fundamentais que desempenham um papel crucial no conforto térmico incluem temperatura, umidade, velocidade do ar e radiação térmica. As demandas humanas por conforto térmico estão intrinsecamente vinculadas ao funcionamento fisiológico, impactando o desempenho durante a realização de atividades cotidianas. Um organismo em condições ideais de conforto térmico não é submetido a fadiga ou estresse, resultando em uma melhoria nas condições de vida e na preservação da saúde (FROTA, 2001).

É relevante considerar que as características climáticas mencionadas têm implicações diretas no conforto térmico da população. Durante o inverno na região sul do Brasil, conforme as informações disponibilizadas pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), a escassez de chuvas, a prevalência de ondas de frio e ar seco resultam em episódios de frio intenso por períodos consecutivos, inclusive com a formação de geadas. A Figura 1, fornecida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), evidencia a ocorrência de temperaturas negativas, chegando a -3°C em algumas localidades durante o inverno do ano de 2021. Essas condições climáticas adversas podem afetar significativamente a percepção e o bem-estar térmico da população, sendo essencial considerar tais fatores ao abordar questões relacionadas ao conforto térmico em contextos específicos.

Diante dessas condições ambientais, para haver o conforto térmico, se faz necessário a utilização de dispositivos que transfiram calor ao ambiente, tais como aquecedores elétricos, aquecedores a óleo, aquecedores halógenos, termo ventiladores, ou outros dispositivos que tenham a mesma finalidade, como é possível visualizar na Figura 2. Atualmente, é grande a quantidade de modelos e formatos existentes no mercado para aquecedores domésticos (TECMUNDO, 2020).

Figura 1 - Distribuição das anomalias de temperatura no Brasil durante o inverno de 2021

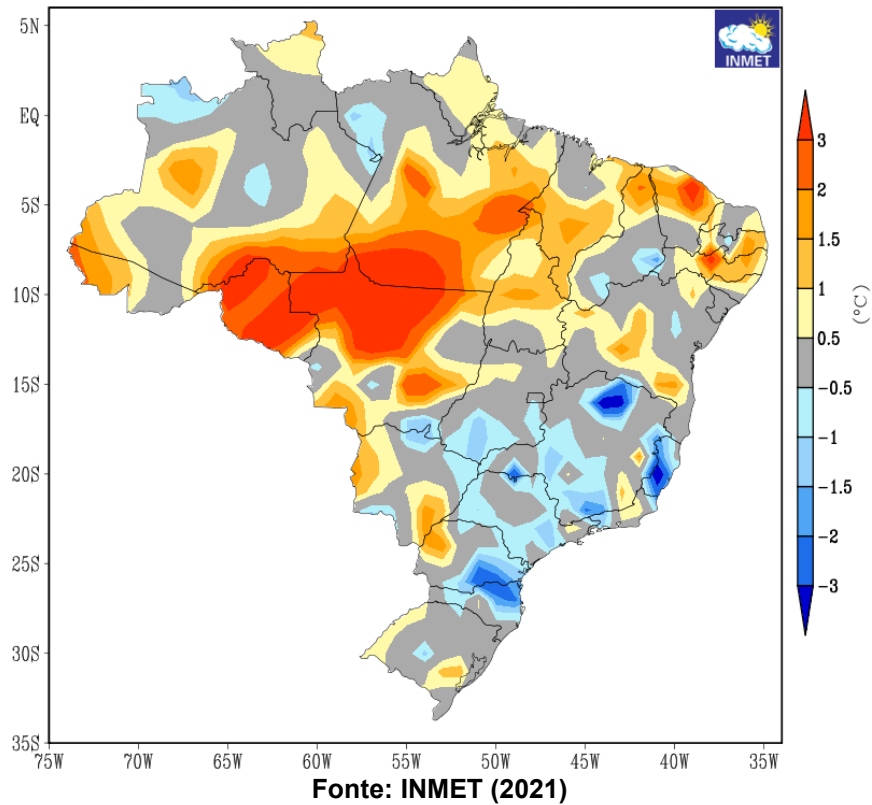
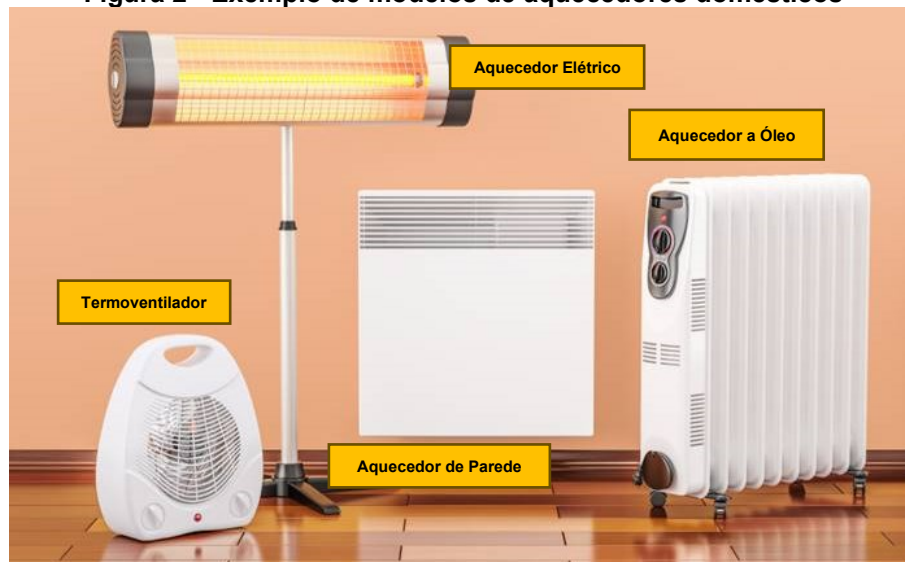


Figura 2 - Exemplo de modelos de aquecedores domésticos



Fonte: Tecmundo (2020)

Os trocadores de calor são dispositivos desenvolvidos ao longo dos anos e estão presentes nos mais diversos equipamentos, como aquecedores, geladeiras e sistemas de condicionamento de ar. Eles funcionam pelas Leis da Termodinâmica e tem por objetivo trocar calor entre o fluido de trabalho e algum ambiente ou algum outro fluido (RIBEIRO *et al.*, 2011).

Os termossifões, também conhecidos como tubos de calor assistidos pela gravidade, são dispositivos passivos de transferência de calor que operam sem partes móveis. Eles utilizam o calor latente de vaporização de um fluido de trabalho para transportar energia térmica de uma superfície quente (evaporador) para uma superfície fria (condensador). Foram inventados no Século XIX e têm sido usados em diversas aplicações desde então. As primeiras aplicações incluíam o aquecimento de água e o resfriamento de motores. No Século XX, os termossifões foram usados em aplicações mais avançadas, como veículos espaciais e satélites (NARESH, 2017).

1.1 Justificativa

Os aquecedores do tipo radiador são empregados na climatização de ambientes residenciais, sendo comumente referidos como aquecedores a óleo. Sua operação interna envolve o aquecimento de resistores elétricos através do efeito Joule, resultando no aumento da temperatura do fluido interno, denominado fluido de trabalho. Por meio da convecção natural, ocorre uma movimentação interna do fluido de trabalho que facilita a transferência de calor das paredes do aquecedor para o ambiente, promovendo o aquecimento.

Ao revisar a literatura, foi observado uma falta de abordagem quanto à implementação do princípio de funcionamento dos termossifões em aquecedores do tipo radiador. Esse fenômeno oferece uma série de vantagens, incluindo versatilidade de aplicação, desempenho confiável e distribuição uniforme de calor. A ausência de estudos nessa área ressalta a oportunidade de explorar diversas condições de operação e conduzir uma análise comparativa entre aquecedores visando a obtenção de conforto térmico em ambientes.

1.2 Objetivos

Esse trabalho tem por objetivo geral analisar experimentalmente o comportamento térmico de um aquecedor assistido pelo princípio de funcionamento de termossifões baseado na utilização da troca térmica do calor latente de vaporização do fluido de trabalho.

Os objetivos específicos dessa dissertação de mestrado são:

- instrumentar um aquecedor do tipo radiador comercial;
- testar experimentalmente um aquecedor do tipo radiador comercial com as configurações de fábrica;

- construir um protótipo de aquecedor do tipo radiador instrumentado para a aplicação do princípio de funcionamento de termossifões;
- testar experimentalmente o protótipo de aquecedor do tipo radiador construído sob diferentes condições operacionais;
- comparar os resultados experimentais do aquecedor comercial com os do protótipo.

1.3 Descrição da Dissertação de Mestrado

Essa Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica está dividida cinco capítulos, três apêndices e um anexo. Neste capítulo inicial, Capítulo 1, foram apresentados a introdução, a justificativa e os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica sobre termossifões, trocadores de calor e aquecedores e uma revisão sistemática da literatura bem como um estado da arte.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia experimental para a avaliação do aquecedor do tipo radiador, bem como seu desempenho térmico e a análise das incertezas experimentais e tratamento estatístico.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados experimentais dos aquecedores do tipo radiador: comercial e protótipo proposto baseado no princípio de funcionamento de termossifões, além de uma discussão sobre esses resultados.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões dessa pesquisa, obtidas por meio do aparato experimental desenvolvido nessa dissertação de mestrado.

No Apêndice A, são apresentados os detalhes do protótipo do aquecedor do tipo radiador. O Apêndice B contém a calibração realizada nos termopares fabricados. O Apêndice C contém o código utilizado no desenvolvimento do sistema de aquisição de potência.

O Anexo A apresenta o documento fornecido pela fabricante *Omega Engineering*[®] contendo a calibração do transdutor de pressão utilizado no aparato experimental.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são descritos os princípios de funcionamento dos termossifões, trocadores de calor e aquecedores. Além disso, são apresentados uma revisão sistemática da literatura e o estado da arte sobre o tema.

2.1 Termossifão

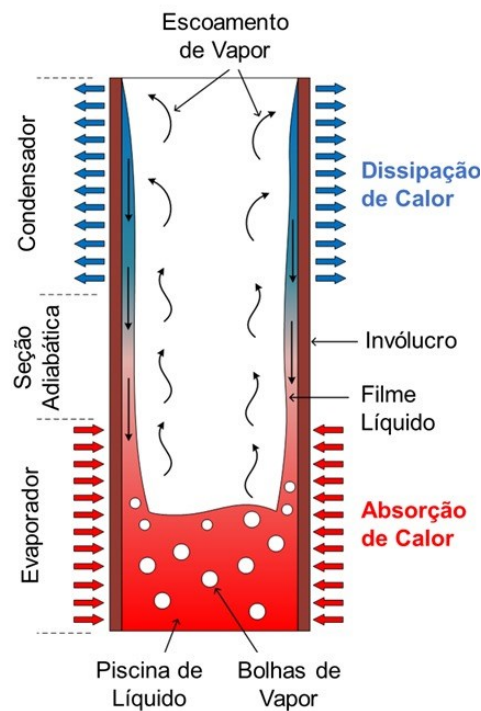
Os termossifões são definidos como dispositivos passivos de transferência de calor de alta eficiência, assistidos pela ação da gravidade. Eles operam em um ciclo termodinâmico com escoamento bifásico, tendo como mecanismo de funcionamento a troca do calor latente de vaporização de um fluido de trabalho (REAY *et al.*, 2014).

O termossifão é constituído por um invólucro evacuado preenchido com um fluido de trabalho e pode compreender em três regiões distintas: evaporador, seção adiabática e condensador, conforme representado na Figura 3. Quando incorporados com uma estrutura interna, esses dispositivos recebem a designação de tubos de calor. Essas estruturas capilares podem ser compostas de pó metálico sinterizado, telas metálicas, ranhuras, entre outras, que capacitam o funcionamento do tubo de calor por meio do bombeamento capilar (KRAMBECK, 2018).

A Figura 3 apresenta as distintas partes de um termossifão, cada uma desempenhando uma função específica durante seu funcionamento. Na parte inferior, denominada região do evaporador, ocorre a absorção de calor proveniente de uma fonte quente, iniciando o processo de evaporação do fluido de trabalho. Esse fenômeno gera um gradiente de pressão no vapor, impulsionando o fluido de trabalho para a região superior, conhecida como região do condensador, onde ocorre a dissipação de calor e a subsequente condensação do fluido de trabalho nas paredes. Por meio da ação gravitacional, o fluido de trabalho no estado líquido retorna ao evaporador, encerrando assim o ciclo termodinâmico. Entre as duas regiões identificadas, pode ser observada a possível presença de uma zona designada como seção adiabática, cuja distinção reside na ausência de trocas térmicas. É importante ressaltar que a existência dessa seção está sujeita a considerações intrínsecas ao sistema em estudo, tais como a geometria envolvida, as propriedades materiais pertinentes e os parâmetros operacionais, os quais podem influenciar significativamente sua presença ou ausência (MANTELLI, 2013).

A escolha do fluido de trabalho, bem como o volume de fluido de trabalho utilizado é de significativa importância, pois são essas escolhas que determinam a faixa operacional do dispositivo, exercendo influência em todo o ciclo termodinâmico. É definido como razão de preenchimento (RP), a proporção do volume interno do dispositivo que é preenchido com o fluido de trabalho. Essa razão é geralmente expressa como uma porcentagem ou fração. Outras características que demandam consideração incluem a pressão de vapor, faixa de operação, estabilidade térmica, toxicidade, condutividade térmica e compatibilidade química entre o fluido de trabalho e o material do invólucro (ZOHURI, 2016).

Figura 3 - Princípio de funcionamento do termossifão



Fonte: Machado et al. (2023)

Conforme Mantelli (2021), os limites operacionais para termossifões são aqueles que determinam os parâmetros que impõem limitações à transferência de calor, estabelecendo assim a taxa máxima do fluxo térmico. Entre eles, são descritos o limite de arrasto, que é consequência das forças de cisalhamento localizadas na interface líquido-vapor; o limite de ebulição, que limita a taxa de calor radial no evaporador; o limite sônico; o limite viscoso e o limite do condensador.

2.2 Trocadores de Calor

Bergman e Lavine (2019) definem os trocadores de calor como equipamentos que permitem a troca de calor entre dos dois fluidos que estão a diferentes temperaturas e separados por uma parede sólida. Suas aplicações são diversas, tais como, aquecimento de ambiente, condicionamento de ar, produção de potência, recuperação de calor em processos, processamento químico, entre outras.

Para cada aplicação dos trocadores de calor requerem-se diferentes acessórios e configurações dos equipamentos. Sendo assim, é possível classificá-los pela configuração do escoamento e do tipo de construção. O tipo mais simples de trocador de calor é o de tubos concêntricos, em que um dos escoamentos passa pela parte anular externa a outro tubo, que também conduz o escoamento de um fluido. A passagem desse escoamento pode ser concorrente ou em contracorrente. Existem também trocadores de calor casco e tubos, compostos por um conjunto de tubos inseridos dentro de um casco, e trocadores de calor de feixe tubular, onde um conjunto de tubos é disposto compactamente, formando um feixe (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

Como alternativa, os trocadores de calor de placas sintetizam as características dos trocadores de calor de casco e tubos, demonstrando elevada eficiência em uma ampla gama de cenários operacionais, sendo frequentemente empregados em aplicações de grande porte. Por outro lado, os trocadores de calor de superfície estendida apresentam uma configuração que amplia as superfícies externas, visando incrementar a área de transferência de calor, sendo adotados em situações em que há limitações de espaço ou quando se almeja otimizar a eficácia térmica (BERGMAN; LAVINE, 2019).

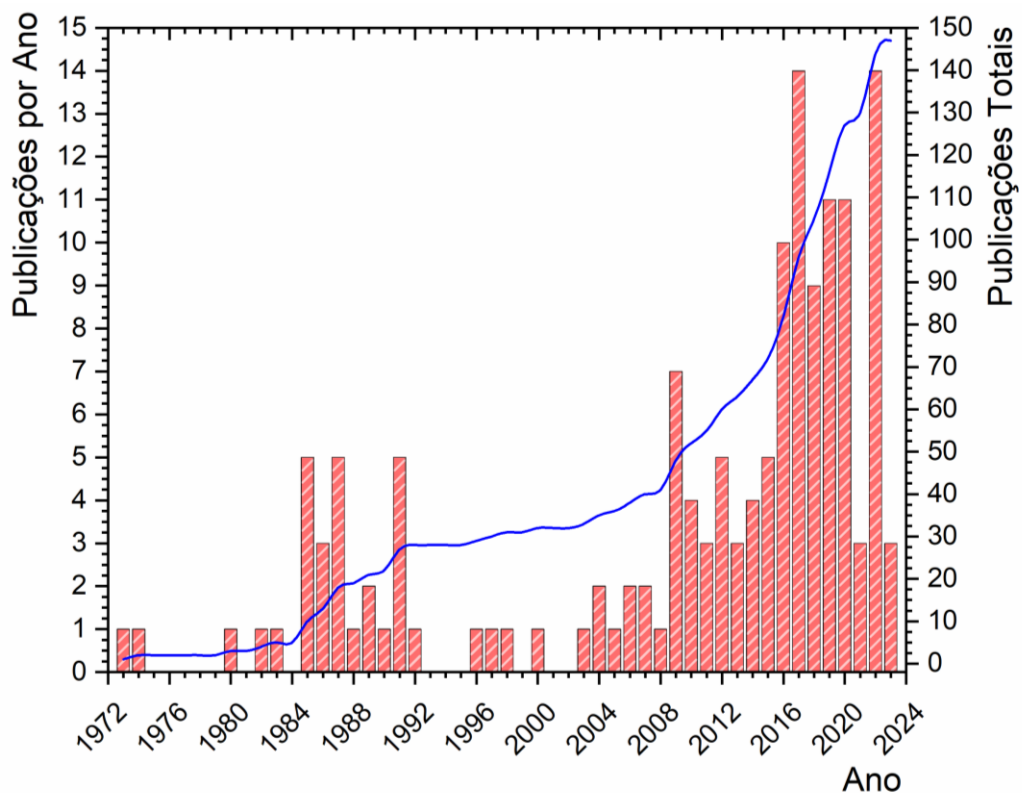
Os aquecedores do tipo radiador apresentam diversas vantagens, sendo aplicados como trocadores de calor domésticos. Em primeiro lugar, eles proporcionam um aquecimento gradual nos ambientes, evitando regiões excessivamente quentes ou frias. Outro benefício, caso sejam utilizados mais de um dispositivo, é a possibilidade de controlar individualmente a temperatura de cada aquecedor, permitindo ajustes personalizados conforme as preferências dos moradores. Além disso, a instalação de aquecedores do tipo radiador é relativamente simples e não requer grandes modificações nas estruturas das residências.

2.3 Revisão Sistemática da Literatura

Nesta seção, é apresentada uma revisão sistemática da bibliografia realizada a respeito da temática estudada. Para isso, foram definidas palavras-chave que nortearam as buscas nas diferentes bases de dados, que tinham como objetivo conhecer o estado da arte no referente assunto. As palavras-chave escolhidas, em inglês, foram: “*Thermosyphon or Thermosiphon*”, “*Efficiency*” e “*Heat Exchanger*”. A utilização da conjuntura “or”, foi realizada por existirem trabalhos publicados com ambas as denominações. As bases de dados selecionadas foram *Elsevier* e *Scopus*.

Com a utilização dessas palavras-chave nessas bases de dados, foram encontrados um total de 147 artigos publicados até o ano de 2024. No Gráfico 1, é mostrada a distribuição das publicações por ano e uma curva mostrando cumulativamente a quantidade de publicações ao longo do período avaliado.

Gráfico 1 - Distribuição da quantidade de artigos publicados pelo ano de publicação



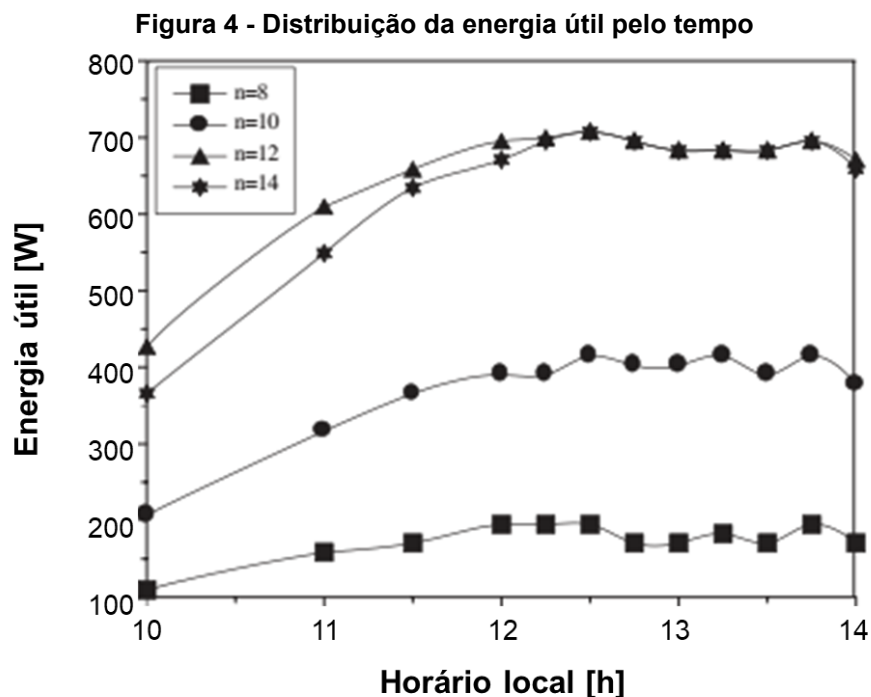
Fonte: Autoria própria (2024)

Por meio do Gráfico 1 foi possível visualizar o crescente aumento de pesquisas do tema em estudo, sendo que nos anos de 2017 e 2022 ocorreram 14 publicações e a média dos últimos 10 anos foi de mais de 8 artigos por ano.

2.3.1 Estado da Arte

Nada *et al.* (2003) realizaram um estudo experimental utilizando termossifões em coletores solares com um trocador de calor casco e tubos sob as condições meteorológicas da cidade do Cairo no Egito. O coletor solar foi desenvolvido, construído e testado para avaliar o desempenho sob diferentes vazões de água de resfriamento com diferentes temperaturas de entrada.

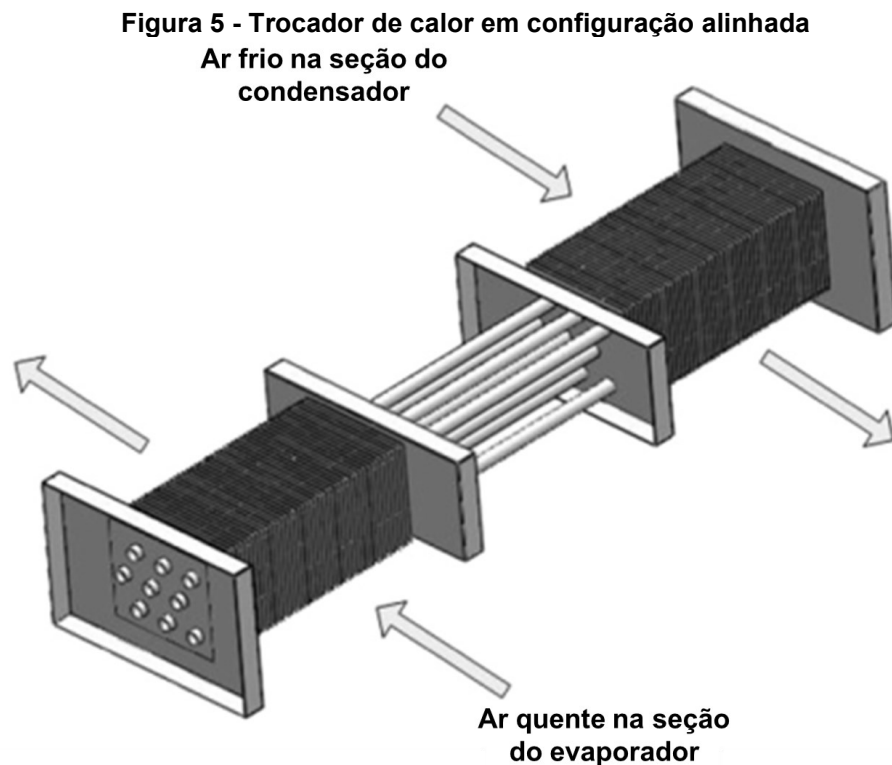
Na Figura 4 são apresentados os valores de energia útil em função do horário local. Os autores concluíram que há incremento na saída útil instantânea e na eficiência instantânea do coletor solar até a quantidade de 12 termossifões. Eles concluíram ainda que a vazão volumétrica ótima de água de resfriamento está coerente com as informações fornecidas na *ANSI/ASHRAE Standard 93-2003* que fornece um conjunto abrangente de diretrizes e procedimentos para a avaliação do desempenho térmico de coletores solares visando promover a padronização e a precisão dos testes realizados nessa área. Pode ser notado que é possível construir um trocador de calor casco e tubos, simples, de baixo custo e com boa eficiência.



Fonte: Adaptado de Nada *et al.* (2003)

Jouhara e Merchant (2011) investigaram experimentalmente um trocador de calor para determinação de seu desempenho, o qual utilizava a tecnologia dos termossifões em configuração alinhada e ar quente escoava pelo evaporador e ar frio pelo condensador, conforme ilustrado na Figura 5. O objetivo do estudo foi avaliar o

desempenho térmico desse trocador de calor sob diferentes inclinações e comparar com uma ferramenta numérica desenvolvida.



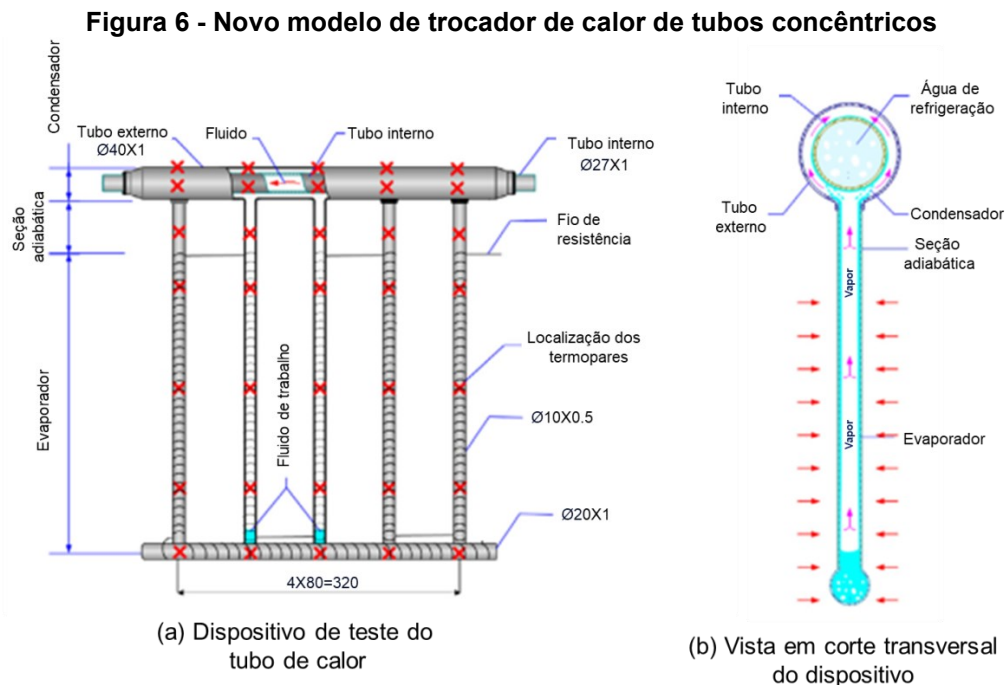
Fonte: Adaptado de Jauhara e Merchant (2011)

Os autores concluíram que aproximadamente 24% da energia pode ser recuperada ao implementar termossifões entre dois escoamentos de ar com diferentes temperaturas. Além disso, eles observaram que o modelo de previsão de eficiência pode ser empregado no desenvolvimento desses trocadores de calor, os quais são viáveis em aplicação de sistemas de condicionamento de ar.

Jauhara *et al.* (2017), em sua revisão bibliográfica sobre o estado da arte dos termossifões, abordaram diversas aplicações, materiais e faixas de temperatura de trabalho, categorizando-as principalmente em operações de baixa e alta temperaturas. No contexto das aplicações em baixas temperaturas, destacaram aquelas realizadas em ambientes criogênicos e no *permafrost*. Em contraste, para as aplicações em altas temperaturas, enfatizaram o uso na recuperação de calor de processos industriais e na integração da energia solar, como nos sistemas fotovoltaicos térmicos (PV/T). Essa abordagem visa otimizar a eficiência dos sistemas, considerando o crescente destaque das questões relacionadas a emissões ambientais e poluição atmosférica.

Por fim, os autores destacaram que os sistemas operando em altas temperaturas têm recebido atenção especial no uso de nanofluidos como fluidos de trabalho, pois a adição de nanopartículas melhora a capacidade térmica do sistema. No entanto, ao longo do tempo, as partículas podem aderir às paredes dos dispositivos passivos de transferência de calor, aumentando assim a resistência térmica. Em conclusão, discorreram sobre o modelamento e a validação dos sistemas que utilizam nanofluidos para aplicações em altas temperaturas, visando maior compreensão e controle dos fenômenos multifásicos, além de estudos associados à razão de preenchimento, à inclinação e ao *Geyser Boiling*.

Xiaoxing e Yaxiong (2018) propuseram um novo modelo de trocador de calor de tubos concêntricos utilizando tubos de calor conforme ilustrado na Figura 6. Esse sistema visa integrar a recuperação de calor do exaustor, com o intuito de aumentar a eficiência da transferência de calor em fontes de baixa temperatura. O desempenho da transferência de calor do novo trocador de calor assistido por tubos de calor usando acetona como fluido de trabalho foi testada experimentalmente sob diferentes ângulos e vazões volumétricas de água em diferentes temperaturas.



Fonte: Adaptado de Xiaoxing e Yaxiong (2018)

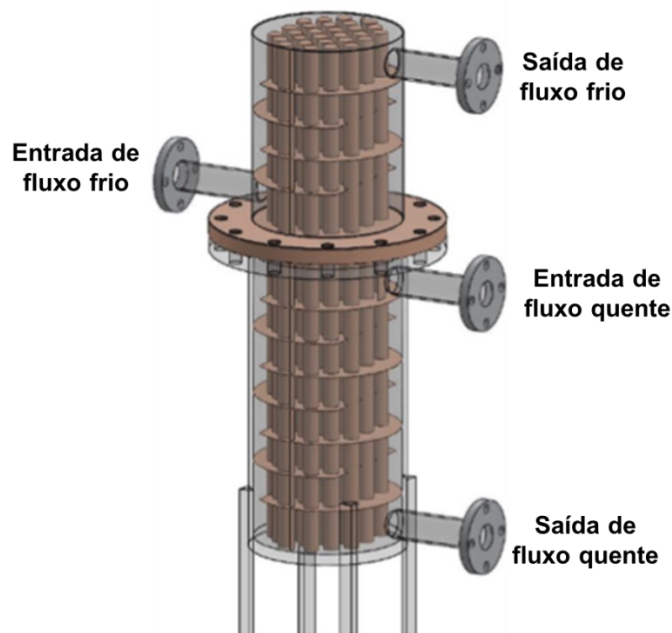
Os autores concluíram que comparando os tradicionais tubos de calor utilizados e o novo modelo proposto de trocador de calor, esse obteve um melhor desempenho térmico, sendo que as melhores condições operacionais foram para

água de resfriamento a 30°C e a uma vazão volumétrica de 0,5m³/h, com uma potência de dissipação de 1600W, apresentando uma resistência térmica média de 0,0042°C/W.

Abdullahi *et al.* (2019) apresentaram um estudo abrangente sobre as características gerais dos termossifões, considerando diferentes condições de operação e ângulos de inclinação necessários para uma utilização eficaz desses dispositivos. Eles apresentaram ainda uma visão geral sobre questões construtivas, operacionais, vantagens e classificações dos modelos, dando atenção particular à diferenciação entre os termossifões e os tubos de calor. Por fim, o trabalho detalhou alguns estudos experimentais que avaliam o desempenho dos termossifões sob diversas condições de operação. Esses estudos incluíram testes de laboratório e simulações computacionais, fornecendo dados empíricos que demonstram como diferentes parâmetros influenciam o desempenho térmico dos dispositivos. Os resultados desses estudos foram apresentados de forma a oferecer uma compreensão clara e prática das melhores práticas para o projeto e a operação de termossifões, contribuindo para o avanço da tecnologia de transferência de calor.

Sarmiento *et al.* (2020) desenvolveram teórica e experimentalmente uma análise em um trocador de calor denominado casca e casca, como tradução livre do Inglês “*Shell and Shell*”, assistido por termossifões para ser utilizado no resfriamento de óleos com diferentes níveis de viscosidade. O trocador de calor, mostrado esquematicamente na Figura 7, consiste em duas cascas cilíndricas conectadas por meio de termossifões enclausurados. Os autores realizaram o desenvolvimento de um modelo teórico para prever a taxa de transferência de calor, o qual combina o Método *Bell-Delaware* para a casca, o esquema térmico equivalente do modelo para os termossifões e um algoritmo de acoplamento térmico. O protótipo foi testado para diferentes vazões mássicas e diferentes temperaturas de entrada do óleo térmico comercial com diferentes viscosidades.

Figura 7 - Trocador de calor casca e casca

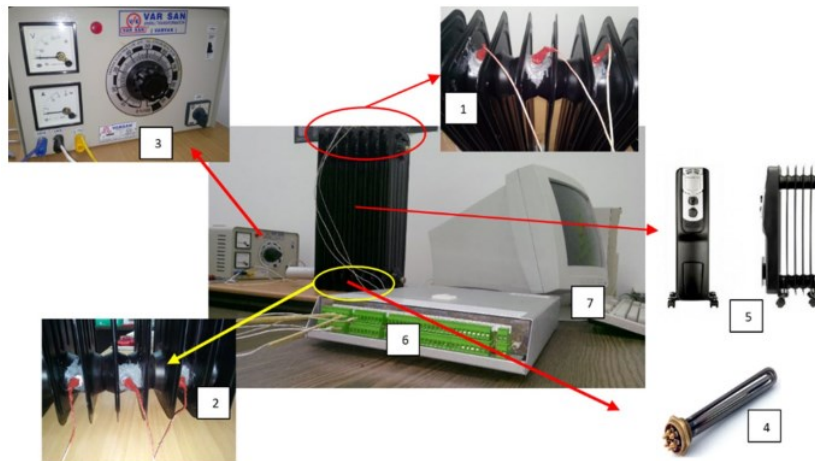


Fonte: Adaptado de Sarmiento et al. (2020)

Os autores concluíram que o protótipo apresentou grande precisão nos resultados e os dados estiveram dentro de $\pm 25\%$. Os pontos coletados estavam uniformemente espalhados, especialmente para o petróleo (aproximadamente 92%). Finalmente, eles concluíram que o modelo proposto pode ser tanto utilizado para o projeto quanto para a análise de um modelo bifásico.

Sahin e Namli (2020) realizaram um estudo utilizando um trocador de calor do tipo radiador, sendo do modelo aquecedor doméstico com o intuito de avaliar o desempenho térmico e a estabilidade de nanofluidos como fluidos de trabalho. Para tal, conforme mostrado na Figura 8, eles utilizaram um aquecedor tipo radiador com um volume total de 2,5L, que possuía uma chave seletora visando escolher qual a potência a ser dissipada no fluido de trabalho. O aquecedor foi equipado com termopares na superfície externa, sendo três na região superior (designada pelos autores como segunda região) e três na região inferior (região do resistor elétrico, designada como primeira região). A coleta de dados foi conduzida ao longo de 120 minutos, com o estado de regime permanente sendo mantido por 15 minutos em cada nível de potência. A coleta dos dados foi baseada nos seguintes parâmetros: valores máximos de temperatura; tempo de aquecimento até atingir o regime permanente e a temperatura inicial do ambiente antes de iniciar o teste experimental.

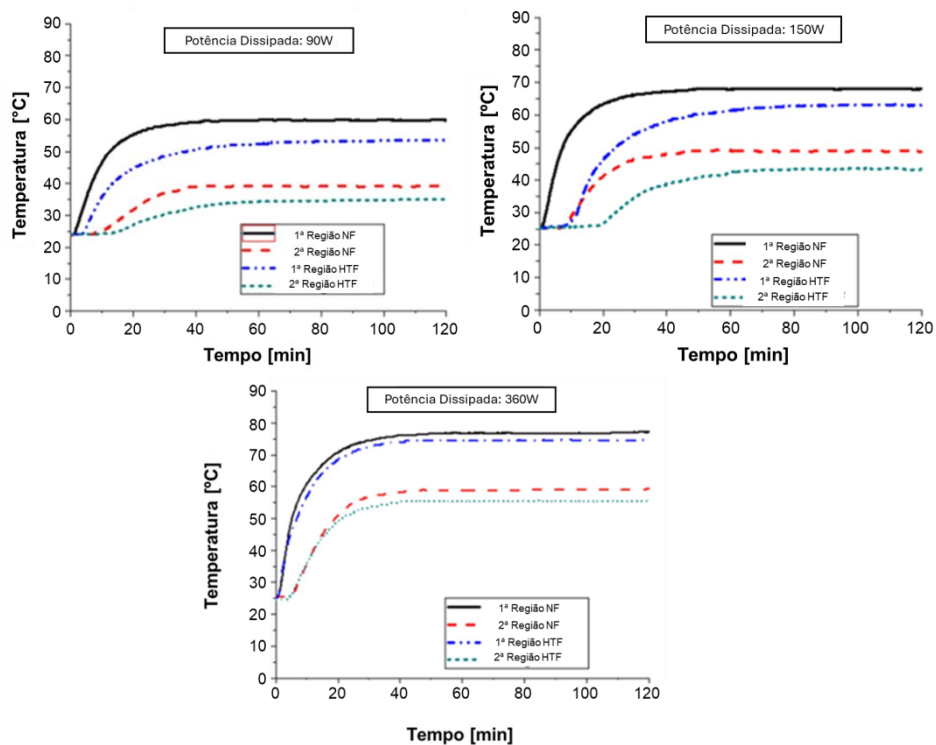
Figura 8 - Aquecedor do tipo radiador para avaliar o desempenho térmico e a estabilidade de nanofluidos



Fonte: Adaptado de Sahin e Namli (2020)

Como resultado, devido à natureza de sua pesquisa, os autores obtiveram resultados da sedimentação de particulado em seu fluido de trabalho bem como algumas informações de coeficientes de difusividade térmica. Eles concluíram nessa etapa que os nanofluidos atingiram as temperaturas máximas mais rápido em comparação com a utilização de óleo como fluido de trabalho, Figura 9, onde as indicações de NF correspondem ao nanofluidos e HTF ao aquecedor utilizando óleo.

Figura 9 - Temperaturas de Regime permanente ao dissipar diferentes cargas térmicas utilizando nanofluidos de alumina como fluido de trabalho



Fonte: Adaptado de Sahin e Namli (2020)

Sahin e Namli (2020) concluíram ainda que houve um incremento na condutividade térmica do fluido de trabalho ao se utilizar nanopartículas em diferentes concentrações, bem como, indicaram que a segunda região do aquecedor foi aquecida por evaporação do líquido. Embora a tendência de temperatura dos nanofluidos na primeira região tenha sido semelhante à do líquido base, diferenças foram observadas na segunda região, indicando que os nanofluidos aumentaram o calor latente de evaporação do líquido base, de acordo com que pode ser encontrado na literatura.

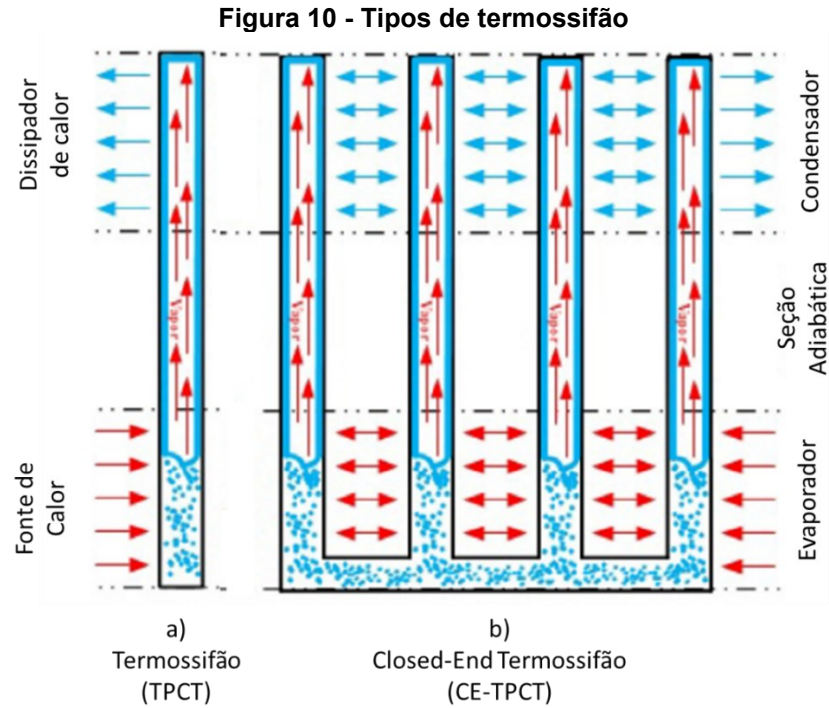
Mantelli (2021), em seu livro intitulado *Thermosyphons and Heat Pipes: Theory and Applications*, oferece um aprofundado conhecimento sobre o tema, abrangendo desde uma introdução até uma análise detalhada dos fenômenos internos de transferência de calor e projeto dos dispositivos. A autora iniciou com uma contextualização histórica e teórica, passando pelos princípios fundamentais que regem a operação dos termossifões e tubos de calor, avançando para discussões mais sofisticadas sobre as complexidades intrínsecas desses sistemas.

Essa obra destaca-se por possuir uma abordagem didática e profunda sobre a temática de termossifões e tubos de calor, desmembrando tópicos de suma importância como a termodinâmica dos fluidos de trabalho, a dinâmica dos filmes líquidos, a interação capilar nos tubos de calor, a influência das condições de contorno, como razão de preenchimento e ângulo de inclinação e os parâmetros geométricos que afetam o desempenho dos dispositivos passivos de transferência de calor.

Além disso, a renomada autora explora os modelos matemáticos que descrevem a transferência de calor e massa, apresentando equações diferenciais e técnicas de solução numérica aplicáveis, não só discute os aspectos teóricos, mas também proporciona uma visão prática e aplicada, incluindo estudos de caso reais e exemplos de projetos industriais. A obra contempla uma ampla gama de aplicações práticas, desde sistemas de resfriamento de eletroeletrônicos até aplicações em engenharia aeroespacial, ilustrando a versatilidade e a eficiência dos termossifões e tubos de calor em diversas áreas.

Parametthanuwat *et al.* (2021) realizaram um estudo investigativo, tendo em vista as características das trocas térmicas de um termossifão “*closed-end*” (CE-TPCT) comparando-o com um termossifão convencional (TPCT), mostrados na Figura 10, feitos em tubo de cobre com o diâmetro interno de 5,5mm e com distância de

separação entre os tubos de 5 vezes o diâmetro interno. Os parâmetros de interesse foram a razão de preenchimento do evaporador (0%, 30%, 50% e 70%) e a temperatura de operação do evaporador (50°C, 70°C e 90°C).

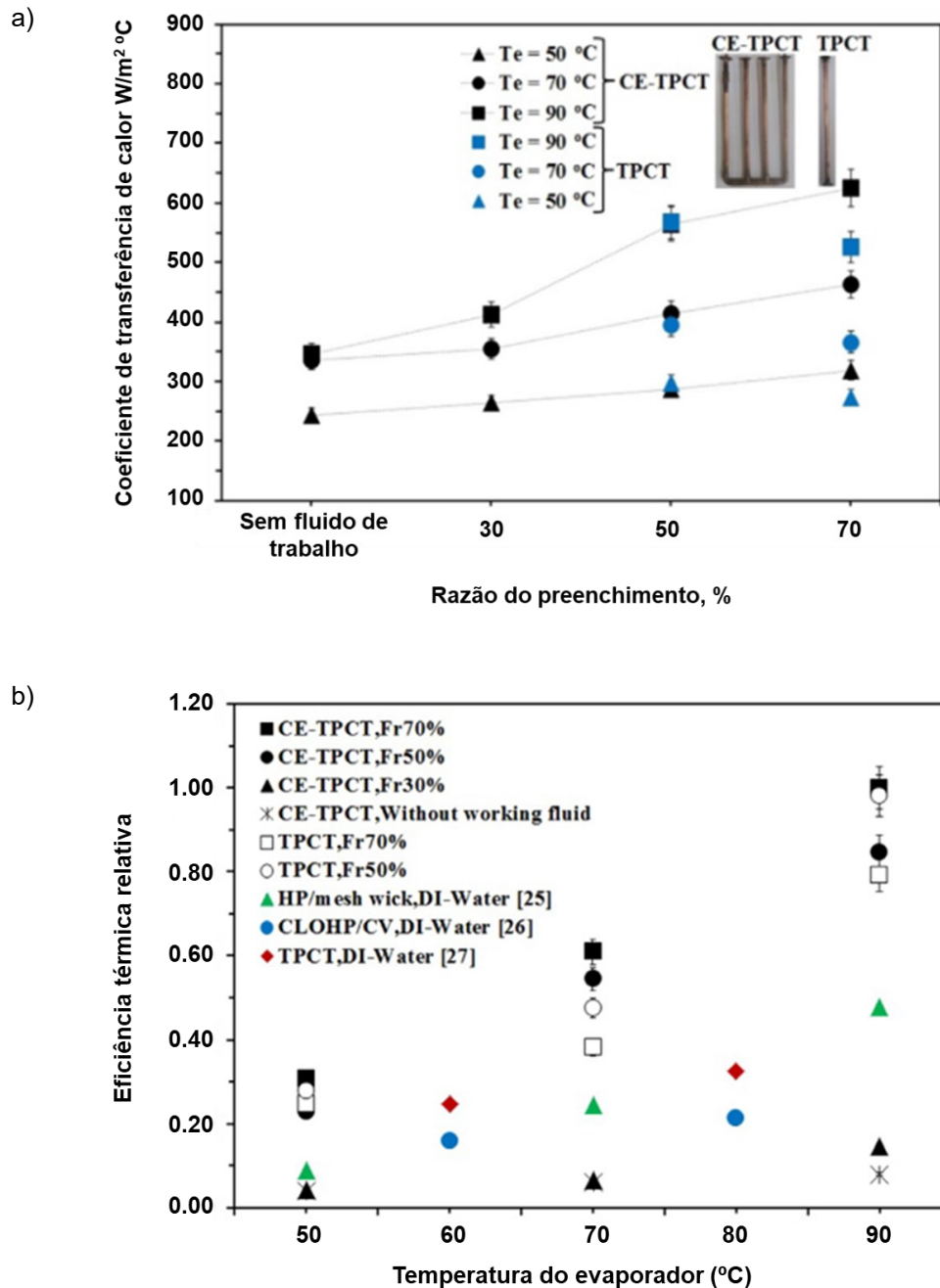


Fonte: Adaptado de Parametthanuwat et al. (2021)

Para controlar as condições de contorno, como o aquecimento da região do evaporador e o resfriamento da região do condensador, foram utilizados banhos térmicos que forneciam um escoamento de água com uma vazão volumétrica de 0,25L/min. A água fornecida ao condensador estava a uma temperatura de 20°C e para o evaporador diferentes temperaturas foram consideradas, especificamente, 50°C, 70°C e 90°C.

A Figura 11 mostra os gráficos obtidos para realizar a análise experimental, onde o primeiro, Figura 11(a), estabelece uma relação entre a razão do preenchimento e o coeficiente de transferência de calor e o outro, Figura 11(b), estabelece um comparativo entre a temperatura do evaporador e a eficiência térmica.

Figura 11 - Resultados do comparativo entre TPCT e CE-TPCT da razão de preenchimento pelo coeficiente de transferência de calor

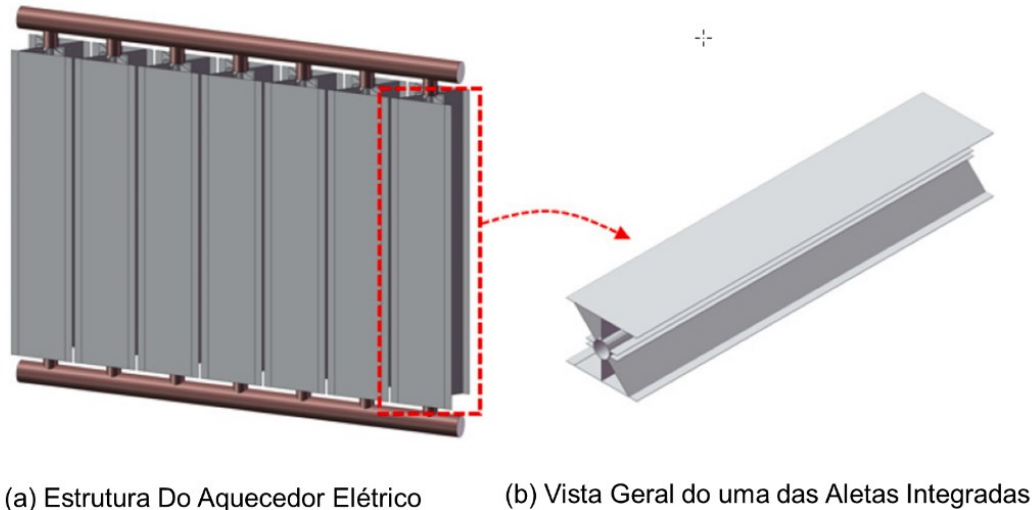


Fonte: Adaptado de Parametthanuwat *et al.* (2021)

Os autores concluíram que um fator de suma importância foi a temperatura do evaporador, que para a temperatura de 90°C, há uma taxa máxima de transferência de calor em todas as condições examinadas, o CE-TPCT apresentou menor resistência térmica total média quando a razão de preenchimento foi de 70% e com temperatura do evaporador de 90°C. Por fim, a maior eficiência térmica relativa foi obtida sob as condições testadas para o CE-TPCT.

Zheng *et al.* (2022) investigaram o desempenho térmico de um aquecedor elétrico, mostrado na Figura 12, utilizando vários nanofluidos de trabalho, SiO_2 -Água, Fe_3O_4 -Água e Cu -Água, em diferentes concentrações. O objetivo foi avaliar como a concentração de nanopartículas influencia a eficiência térmica do dispositivo.

Figura 12 - Diagrama do aquecedor elétrico

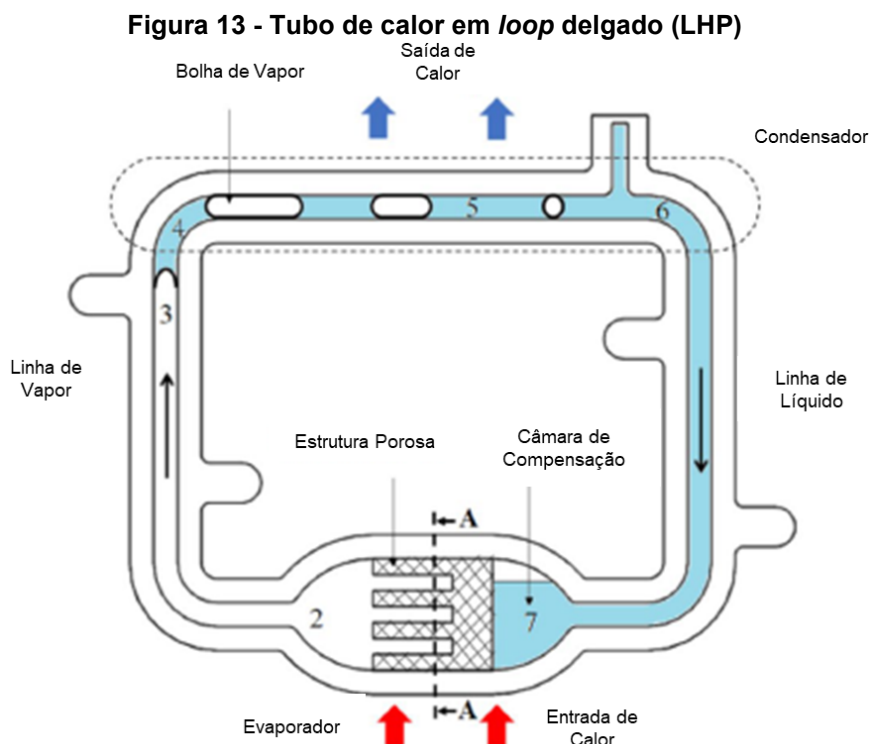


Fonte: Adaptado de Zheng *et al.* (2022)

Os autores concluíram que o nanofluido Cu -Água proporcionou a maior eficiência de aquecimento para o ambiente externo. No entanto, o nanofluido Fe_3O_4 -Água, quando exposto a campos magnéticos, atingiu uma temperatura de equilíbrio de $65,6^\circ\text{C}$, que é apenas $0,1^\circ\text{C}$ inferior à do nanofluido Cu -Água. Embora o nanofluido Fe_3O_4 -Água tenha um tempo de aquecimento mais longo comparado ao nanofluido Cu -Água, ele representa uma alternativa de baixo custo para alcançar um aquecimento eficiente. Portanto, eles demonstraram um método econômico e valioso para melhorar o desempenho térmico de estruturas de aquecimento elétrico.

De Souza *et al.* (2023) investigaram experimentalmente o fenômeno de *Geyser Boiling* em termossifões operando simultaneamente com dois fluidos distintos: água e óleo. O *Geyser Boiling* ocorre periodicamente sob condições específicas e está associado a instabilidades na nucleação durante a ebulição. A amplitude e a frequência desse fenômeno estão diretamente relacionadas às condições operacionais do termossifão, incluindo a razão volumétrica dos fluidos de trabalho, a dissipação de calor no evaporador e a remoção de calor no condensador. Os autores concluíram que a caracterização dos fluidos de trabalho, sejam eles puros ou misturas, pode ser realizada utilizando os números adimensionais de *Reynolds*, *Jacob* e *Bond*.

Dominiciano *et al.* (2023) desenvolveram um novo modelo de tubo de calor delgado em *loop* (LHP), conforme mostrado na Figura 13. Eles realizaram a modelagem teórica e a construção do tubo de calor, que foi fabricado por meio de união por difusão. O objetivo foi avaliar aspectos como resistência térmica, distribuição de temperatura, taxa de transferência de calor, perda de calor por condução e o comprimento dos escoamentos de fluido de trabalho monofásico e bifásico dentro do condensador. Os resultados teóricos foram comparados com dados experimentais obtidos de um LHP, utilizando água como fluido de trabalho, a fonte de frio era a convecção natural do ar para o ambiente.



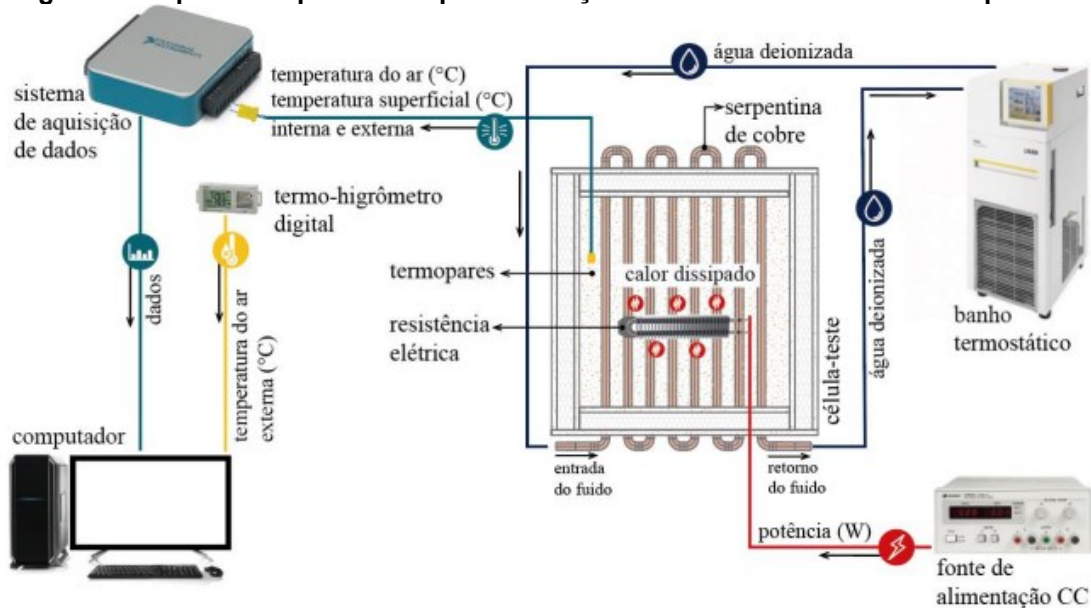
Fonte: Adaptado de Dominicano *et al.* (2023)

Os autores concluíram que o dispositivo funcionou bem tanto na posição horizontal quanto vertical, e os testes experimentais foram realizados até o evaporador alcançar 100°C. O modelo previu com precisão todos os parâmetros operacionais do LHP em regime estacionário, com apenas pequenas variações. Isso demonstrou que o modelo foi adequado para projetar novos LHPs e outros dispositivos delgados, sendo uma solução eficaz para o resfriamento de pequenos eletroeletrônicos, como *smartphones*.

Almeida *et al.* (2023), em seu aparato experimental mostrado na Figura 14, verificaram a viabilidade da aplicação de termossifões como estratégia para o

resfriamento passivo de ambientes internos, utilizando-se de uma célula-teste integrada à um trocador de calor em formato de serpentina, que simulou a seção do evaporador de um termossifão. Como condições de contorno, a temperatura da serpentina foi mantida constante e uniforme ao longo do seu comprimento por um banho de temperatura controlada e a dissipação de calor no interior da célula-teste foi feita por um resistor elétrico com uma potência conhecida.

Figura 14 - Aparato Experimental para avaliação de sistema de resfriamento passivo



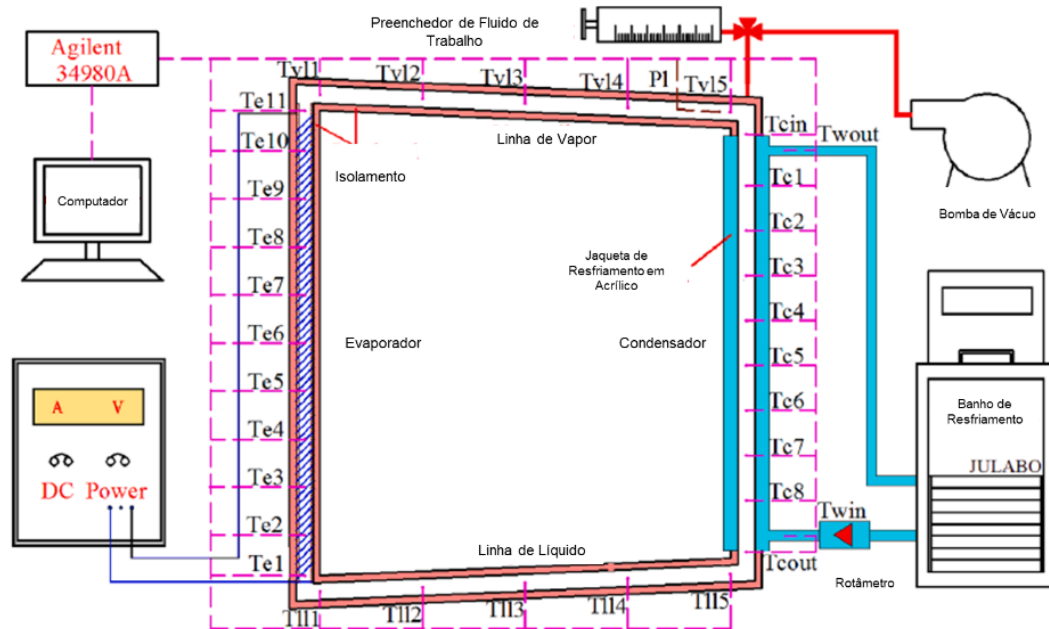
Fonte: Adaptado de Almeida et al. (2023)

Os autores observaram que o dispositivo conseguiu extrair calor passivamente do ambiente, reduzindo significativamente a temperatura interna do ar. A maior parte do calor foi removida na primeira hora e meia de testes experimentais. No entanto, a transferência de calor foi inadequada quando a diferença de temperatura entre a serpentina e a célula era de 7°C ou menos. A temperatura interna foi consistentemente mais alta nos quadrantes superiores da célula. Além disso, a estabilização das temperaturas internas foi mais lenta quando a temperatura da serpentina de cobre aumentou.

Wang et al. (2024) realizaram uma avaliação experimental de um modelo de termossifão em *loop* (circuito fechado), conforme apresentado Figura 15, com o objetivo de investigar as características iniciais e o desempenho térmico dos sistemas. Os testes experimentais foram conduzidos em condições de baixo fluxo de calor, variando as razões de preenchimento com etanol e utilizando configurações com e

sem estruturas internas no evaporador. Além disso, os experimentos foram realizados sem variação de altura entre a saída do evaporador e a entrada do condensador.

Figura 15 - Novo modelo de termossifão em *loop* para teste com etanol

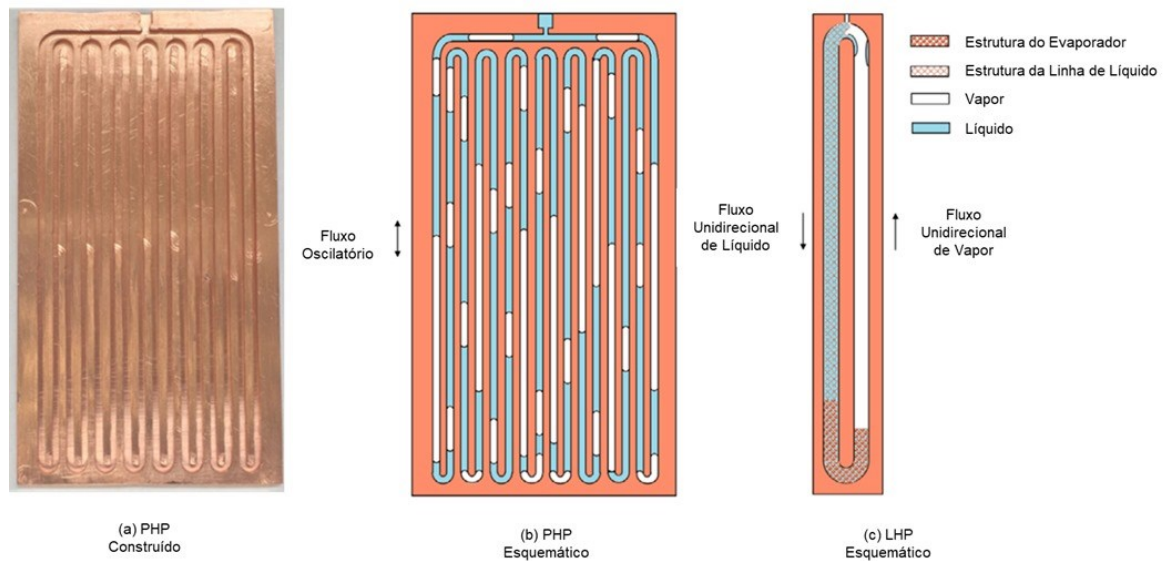


Fonte: Adaptado de Wang et al. (2023)

Os autores concluíram que ambos os sistemas falharam com uma razão de preenchimento de 30%, pois superaram o limite operacional de 100°C. O sistema foi estável com uma potência superior a 10W para o termossifão com estruturas internas e 25W para o termossifão sem estruturas internas. Aumentar a razão de preenchimento prejudicou a uniformidade da temperatura no evaporador e a resistência térmica foi mínima com uma razão de preenchimento de 70%. Ambos os sistemas mostraram bom desempenho na transferência de calor quando a potência de entrada era alta.

Krambeck et al. (2024) avaliaram experimentalmente dois modelos de tubos de calor planos em *loop* com oito canais (PHP), sendo dois paralelos interligados, um com meio poroso metálico sinterizado, formando quatro tubos de calor em *loop* paralelos. A fabricação dos tubos de calor foi feita por união por difusão, conforme é mostrado na Figura 16 ilustrando também algumas características do funcionamento. Eles compararam com um tubo de calor pulsante plano (LHP), também fabricado por difusão, utilizando água destilada como fluido de trabalho, em diferentes razões de preenchimento, taxas de transferência de calor e em diversas orientações.

Figura 16 - Novo modelo de termossifão em *loop* para teste com etanol



Fonte: Adaptado de Krambeck *et al.* (2023)

Os tubos de calor planos mostraram desempenho eficaz na orientação assistida pela gravidade, com resistência térmica quase constante entre 80W e 170W. Na orientação horizontal, o desempenho foi satisfatório em baixas cargas a 24W. O tubo de calor pulsante convencional apresentou melhor desempenho em altas potências, com a menor resistência térmica a 170W. Os autores concluíram que os tubos de calor planos eram adequados para faixas específicas de potência e oferecem uma alternativa viável para o resfriamento de dispositivos eletroeletrônicos planos.

Diante do contexto, ressalta-se que, apesar da revisão bibliográfica efetuada, não foi encontrado nenhum estudo ou pesquisa que abordasse especificamente a interseção do uso do princípio de funcionamento de termossifões em aquecedores do tipo radiador para o aquecimento de ambientes internos. Considerando que o radiador é um dos dispositivos mais utilizados para aquecimento residencial, essa lacuna evidencia uma área de pesquisa que possui abordagens a serem exploradas e destaca a importância de investigações nessa temática.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais, os equipamentos e os procedimentos utilizados para a execução dos testes experimentais no Laboratório de Controle Térmico (LabCT) vinculado ao Programa de Pós-Graduação (Mestrado) *Multicampi* em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) do Campus Ponta Grossa.

Essa pesquisa é de caráter experimental e, para isso, foram utilizados recursos para a coleta de dados, bem como o tratamento e a apresentação dessas informações.

3.1 Aparato experimental

Nesta seção são apresentadas as características do aquecedor do tipo radiador utilizado durante o desenvolvimento do presente estudo experimental.

3.1.1 Descritivo de funcionamento de trocadores de calor do tipo radiador

Os trocadores de calor do tipo radiador, conforme mostrado Figura 17, são dispositivos fabricados por meio da estampagem e conformação de chapas metálicas, possuindo dimensões totais, após construído, de 578mm x 280mm x 150mm. A parte central do radiador apresenta canais que conectam os reservatórios das partes superior e inferior. Essas partes são circundadas por regiões majoritariamente planas, caracterizadas como aletas, que aumentam a área de transferência de calor do radiador.

Figura 17 - Aquecedor a óleo Mondial® A-06



Fonte: Mondial (2023)

Nesses trocadores de calor do tipo radiador, um sistema eletrônico é instalado em sua lateral, permitindo ligar e desligar o aquecedor a óleo, além de gerenciar o nível de potência a ser dissipado. É possível escolher até três níveis de potência na chave seletora. A chave seletora está conectada a um resistor elétrico de imersão, conforme mostrado na Figura 18. Esse resistor elétrico possui uma potência máxima de 1,5kW quando conectado a uma tensão de 220V. Ele possui uma conexão roscada de 1 ½" na região inferior do dispositivo, onde há uma estrutura preparada. Nessa região, as chapas se conectam e, no espaço interno, há uma intercomunicação entre os espaços vazios.

Figura 18 - Resistor elétrico de imersão



Fonte: Residal (2024)

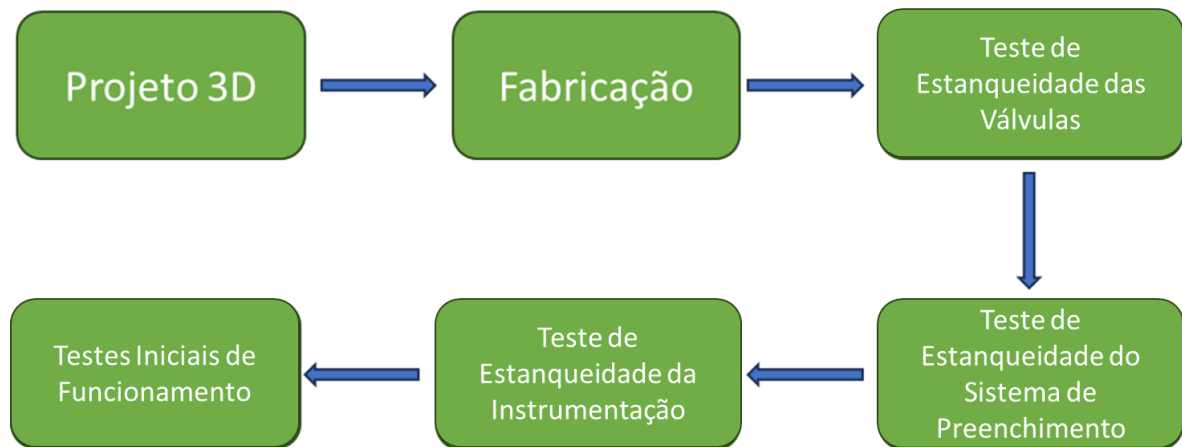
Essa região vazia é quase totalmente preenchida com um fluido de trabalho, que comercialmente é um óleo mineral com características similares ao CAS 8042-47-5. Esse fluido possui um ponto de fulgor de 135°C e uma temperatura de ignição superior a 300°C. Ele está classificado com a declaração de perigo H304, indicando que pode ser mortal se ingerido e penetrar nas vias respiratórias. A classe de armazenagem do fluido é 10-13 e sua classificação WGK é 1, indicando que é um leve contaminante da água.

O trocador de calor do tipo radiador opera convertendo energia elétrica em energia térmica por meio do efeito *Joule* em um resistor elétrico, aquecendo assim o óleo ao seu redor. Esse calor resultante promove a difusão térmica na área adjacente ao resistor elétrico, elevando a temperatura do fluido de trabalho. Internamente, o dispositivo utiliza convecção natural: o fluido aquecido, menos denso, desloca-se para as regiões superiores, enquanto o fluido mais frio e mais denso desce para as regiões inferiores. Esse fluxo convectivo facilita a distribuição e a transferência de calor dentro do aquecedor a óleo, otimizando o processo de troca térmica.

3.1.2 Projeto e montagem do protótipo do aquecedor

Considerando as características do aquecedor a óleo comercial, tornou-se necessário avaliar o projeto 3D do trocador de calor do tipo radiador e, conseqüentemente, elaborar algumas modificações para possibilitar sua operação baseada no princípio de funcionamento de termossifões. A Figura 19 ilustra o diagrama de fluxo seguido durante a realização do projeto do protótipo de um trocador de calor do tipo radiador, com o objetivo de alcançar um nível elevado de confiabilidade no projeto. Devido às condições que exigem a realização de vácuo no protótipo, precauções adicionais foram indispensáveis nessa etapa.

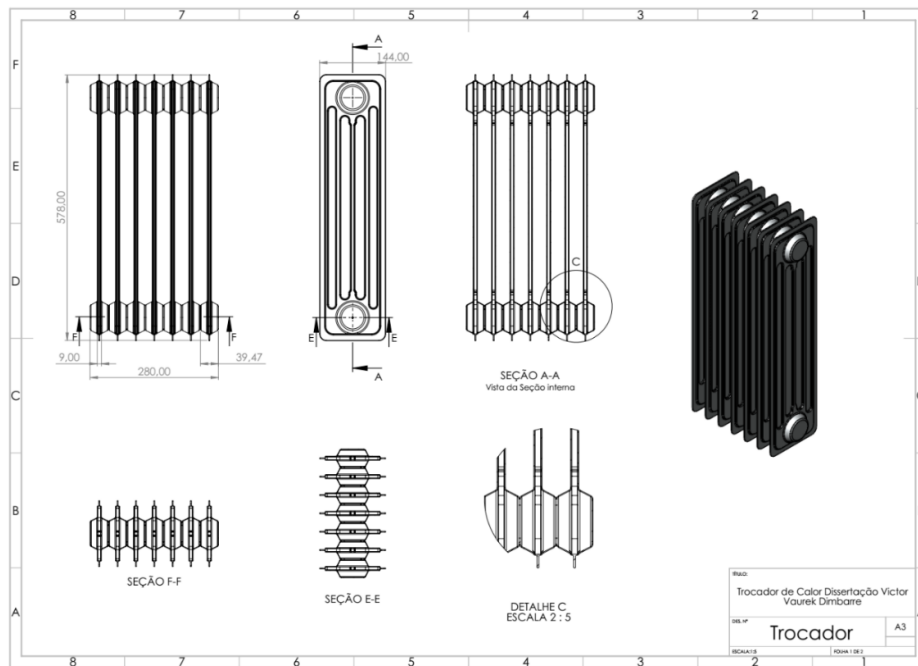
Figura 19 - Diagrama de fluxo do projeto e montagem do experimento



Fonte: Autoria própria (2024)

Inicialmente, para o desenvolvimento do protótipo do aquecedor do tipo radiador em estudo, foram analisadas a geometria e as áreas de interesse para a determinação de seu comportamento térmico. A Figura 20, gerada pelo *software* de modelagem 3D *SolidWorks*®, apresenta o projeto inicial do aquecedor do tipo radiador, no qual são mostradas informações preliminares sobre dimensionamentos e características geométricas do aparato.

Figura 20 - Projeto preliminar do aquecedor do tipo radiador



Fonte: Autoria própria (2024)

Primeiramente, foi montado no Laboratório de Controle Térmico (LabCT) o aparato experimental contendo: um aquecedor a óleo comercial *Mondial*®A-06; um sistema de aquisição de dados *Keysight*® DAQ970A utilizando um multiplexador *Keysight*® DAQM901A de 20 canais e um sistema de aquisição de potência conectados à um computador, conforme diagrama esquemático ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Diagrama esquemático do aparato experimental: aquecedor comercial

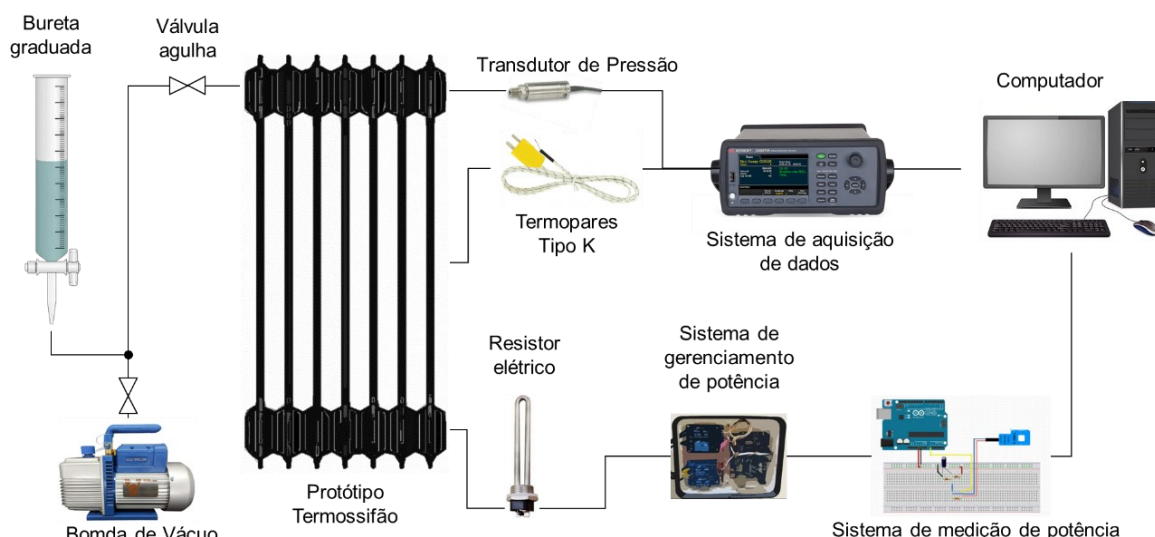


Fonte: Autoria própria (2024)

Com o aparato experimental utilizando o aquecedor comercial original montado foi observado que seriam necessárias adaptações no dispositivo para se realizar a substituição do fluido de trabalho associado à aplicação da tecnologia do princípio de funcionamento de termossifões e aquisição de dados internos. O Apêndice A contém detalhes do projeto e desenhos técnicos do protótipo do aquecedor do tipo radiador.

A Figura 22 mostra o diagrama esquemático do protótipo ao qual foram acrescentados acessórios ao aquecedor do tipo radiador. A ligação ramificada foi composta por válvulas aeronáuticas do tipo agulha da marca *Swagelock*[®], sendo que uma das válvulas está conectada a uma bomba de vácuo *EOS*[®] de duplo estágio, com capacidade de 12CFM e a outra válvula está conectada a uma bureta graduada, para aferir o volume de fluido de trabalho que está sendo introduzido ao protótipo analisado. As temperaturas internas foram obtidas por sondas termopares *Omega Engineering*[®] TC-K-NPT-G enquanto a pressão interna foi medida por meio de um transdutor de pressão *Omega Engineering*[®] PXM309. Além disso, um sistema de gerenciamento de potência foi necessário.

Figura 22 - Diagrama esquemático do aparato experimental: protótipo



Fonte: Autoria própria (2024)

A Fotografia 1 apresenta os aparatos experimentais montados e instrumentados no LabCT, no lado esquerdo o aquecedor comercial e no lado direito o protótipo assistido pelo princípio de funcionamento de termossifões.

Fotografia 1 - Aparato experimental: aquecedores e bomba de vácuo



Fonte: Autoria própria (2024)

Ambos os aquecedores possuem uma potência máxima estimada de 1500W, fornecida por um resistor elétrica, com uma chave seletora, permitindo o ajuste das potências em 0W, 600W, 900W e 1500W.

3.1.3 Sistema de aquisição de dados

Para a aquisição das temperaturas internas no protótipo aquecedor, foram utilizadas dez sondas termopares do tipo K EGT em aço inoxidável 304 da marca *Omega Engineering*® modelo TC-K-NPT-G, que resistem até 2500psi à temperatura ambiente, previamente calibradas com um termômetro de mercúrio. O posicionamento dos termopares está apresentado no Apêndice A.

Para a aquisição dos dados de temperaturas externas, foram fabricados 10 termopares do tipo K para cada um dos aquecedores, utilizando cabos com isolamento de neoflon TFA e 30AWG da *Omega Engineering*®. Nove desses termopares foram utilizados para aquisição da temperatura de superfície do aquecedor do tipo radiador e um utilizado para aquisição da temperatura ambiente. Para obtenção de imagens termográficas foi utilizada uma câmera termográfica *FLIR*® T-440. Para a aquisição dos dados referentes à pressão interna foi utilizado um transdutor de pressão *Omega Engineering*® PXM309, com uma faixa de operação de 0bar a 2bar de pressão absoluta, sendo que informações adicionais de calibração fornecidas pelo fabricante constam no Anexo A.

Finalmente, todos esses elementos foram conectados a um sistema de aquisição de dados *Keysight*® DAQ970A contendo três multiplexadores *Keysight*® DAQM901A de 20 canais cada que está conectado a um computador (Fotografia 2).

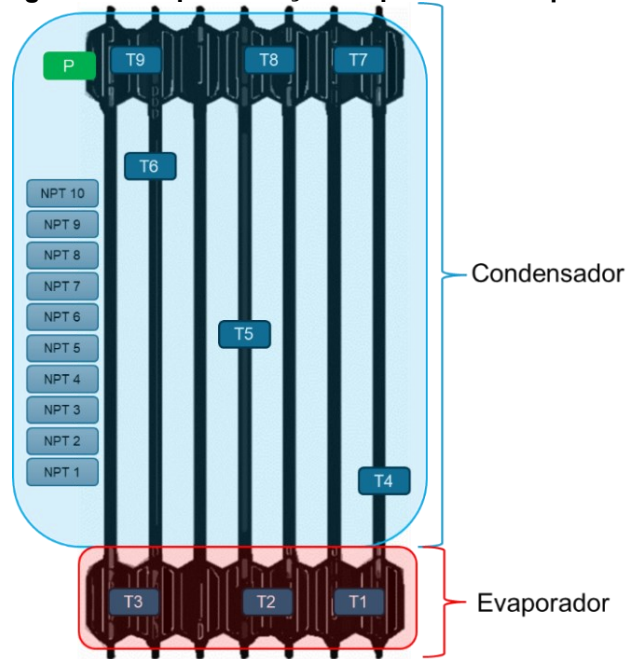
Fotografia 2 - Aparato experimental: visão geral



Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 23 ilustra uma representação do posicionamento dos termopares internos (NPT) e externos instalados (T), do transdutor de pressão (P), da região do condensador (delimitada pela cor azul) e da região do evaporador (delimitada pela cor vermelha) do protótipo de aquecedor do tipo radiador assistido pelo princípio de funcionamento de termossifões. Informações adicionais de posicionamento estão contidas no Apêndice A.

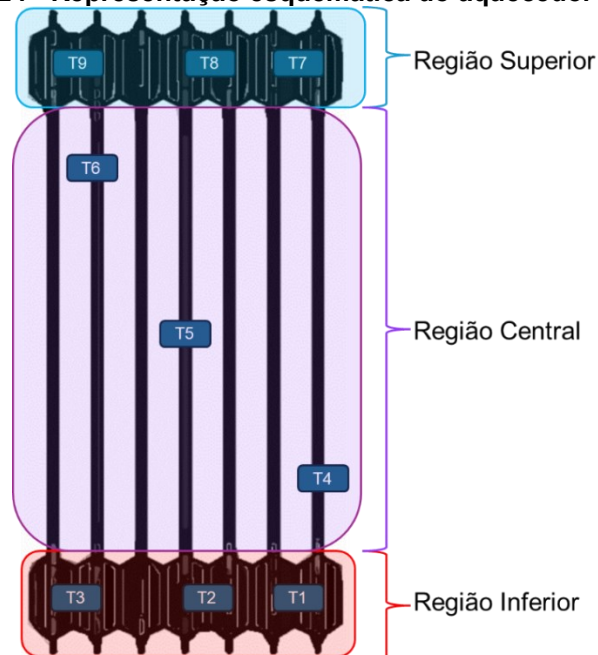
Figura 23 - Representação esquemática do protótipo



Fonte: Autoria própria (2024)

De forma análoga, a Figura 24 ilustra o posicionamento dos termopares (T) no aquecedor comercial visando estabelecer um comparativo entre as temperaturas superficiais de ambos os dispositivos. A região superior é representada pela coloração azul, a região central é representada pela coloração roxa enquanto a região inferior está representada pela coloração vermelha.

Figura 24 - Representação esquemática do aquecedor comercial



Fonte: Autoria própria (2024)

3.1.4 Fabricação e calibração dos termopares

A fabricação dos termopares utilizados, para medição de temperatura de superfície nos aquecedores do tipo radiador, foi realizada no Laboratório de Controle Térmico (LabCT) utilizando cabos do tipo K modelo TT-K-30-SLE e conectores modelo SMPW-K do tipo K da *Omega Engineering*®, bem como equipamento de solda da *Omega Engineering*® modelo TL-WELD conforme mostrado na Fotografia 3. No lado esquerdo é apresentado um termopar preparado para ser soldado enquanto no lado direito é mostrado um termopar após o processo de soldagem.

Fotografia 3 - Solda de termopares do tipo K



Fonte: Autoria própria (2024)

Feito isso, os termopares foram calibrados com o auxílio de um termômetro de mercúrio de escala interna de -10°C a $+110^{\circ}\text{C}$ com resolução de $0,5^{\circ}\text{C}$, como referência para ser estabelecida uma curva entre um valor medido pelo termopar e pelo valor com o dispositivo de referência. Esse processo de calibração faz com que os termopares utilizados apresentem uma maior acurácia nos valores obtidos.

Considerando que, durante esse processo, a temperatura é medida várias vezes, avalia-se o desvio padrão entre esses valores. Além disso, é fundamental verificar se a calibração dos termopares utilizados foi realizada com êxito, conforme detalhado no Apêndice B. Dessa forma, cada termopar empregado no experimento foi calibrado, garantindo uma maior confiabilidade nos valores das temperaturas medidas.

3.1.5 Desenvolvimento do sistema de aquisição de potência

Para a análise de potência dissipada no resistor elétrico foi implementado um sistema *Arduino*® UNO para medir os valores de corrente elétrica, sendo eles: um sensor ACS712-30A, que tem por princípio ser invasivo ao sistema, ou seja, um dispositivo de medição que precisa ser inserido ou instalado diretamente na região de interesse de um sistema, e um sensor SCT-013 25A não invasivo, que pode realizar medições ou monitoramento sem a necessidade de penetrar ou interferir diretamente na área ou no objeto que está sendo observado.

Para a medição dos parâmetros ambientais, como temperatura ambiente e umidade relativa do ar, foram utilizados um sensor AHT10 de boa precisão. Todo esse sistema foi montando em uma placa genérica, que são placas com capacidade de leitura de entradas analógicas e digitais, saídas, interfaces de comunicação serial, além da capacidade de conectar sensores, módulos e outros dispositivos eletroeletrônicos para criação de projetos interativos, para evitar ruídos nas leituras conforme mostrado na Fotografia 4. A linguagem de programação é apresentada no Apêndice C.

Fotografia 4 - Sistema de Aquisição de Potência



Fonte: Autoria própria (2024)

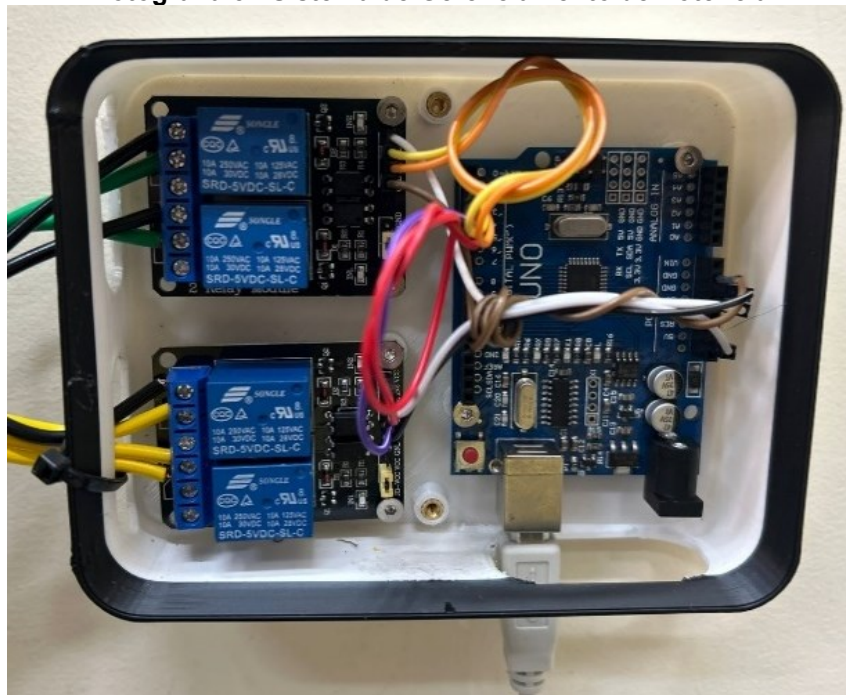
3.1.6 Sistema de gerenciamento automático de potência

Com o intuito de obter curvas parametrizadas no intervalo de tempo para cada uma das potências dissipadas foi desenvolvido um sistema automático, no qual foram controladas as seguintes variáveis:

- intervalo de tempo de dissipação de potência individualizado para cada nível;
- diferentes níveis de cargas térmicas dissipadas;
- intervalo de tempo entre cada cargas térmicas dissipadas;
- quantidade de vezes a realizar o ciclo.

A Fotografia 5 ilustra o sistema montado, sendo utilizados 2 módulos de relé de 2 canais 5V/10A, totalizando 4 relês, que comutam fazendo o chaveamento ou interrupção eletromecânica, formando a combinação especificada em código; um *Arduino*® UNO e um disjuntor de 12A, com o intuito de proteger o sistema contra eventuais curtos-circuitos ou outro problema relacionado ao fornecimento de energia elétrica ao sistema.

Fotografia 5 - Sistema de Gerenciamento de Potência



Fonte: Autoria própria (2024)

3.2 Procedimento experimental

Para desenvolver o procedimento experimental para o protótipo de aquecedor nessa dissertação de mestrado, foi seguida como referência Mantelli (2021), que fornece um guia completo para concepção, fabricação e testes de termossifões e/ou tubos de calor.

3.2.1 Limpeza e preparo do protótipo do aquecedor

Para iniciar os testes experimentais, foi necessário que no interior do protótipo do aquecedor do tipo radiador existisse apenas o fluido de trabalho. Para tal, o procedimento foi composto pelas seguintes etapas:

Etapas #1 – Limpeza com água destilada: o aquecedor do tipo radiador deve ser preenchido totalmente com água destilada (volume aproximado: 2,85L) através da bureta graduada e depois esvaziado, pela parte inferior, até que a água de saída apresente as mesmas características à de entrada, no caso apresentar transparência e ausência de partículas.

Etapas #2 – Evacuação: o aquecedor do tipo radiador deve ser conectado ao sistema de bombeamento de vácuo. Para tal, deve ser verificado o conjunto de válvulas sendo que, a válvula de conexão com a bureta graduada deve estar fechada, a válvula de esgotamento deve se encontrar fechada e a válvula de conexão com a bomba de vácuo deve estar aberta. Além disso, deve ser verificado se o sistema do transdutor de pressão está ligado e fazendo aquisição dos dados de pressão interna. Após verificados todos esses itens, a bomba de vácuo foi ligada e deu-se início ao processo de vácuo que deve ser de aproximadamente 6 horas. Feito isso, conclui-se com o fechamento de todas as válvulas e com o desligamento da bomba de vácuo, sendo possível verificar que a informação dada pelo transdutor de pressão foi que a pressão interna estava abaixo da pressão atmosférica.

Etapas #3 – Preenchimento com fluido de trabalho: Primeiramente, foi preciso verificar a quantidade de fluido de trabalho necessária para o preenchimento interno do aquecedor do tipo radiador. Uma vez determinado esse parâmetro, procedeu-se com o preenchimento da bureta graduada. Foi importante notar que a

capacidade da bureta é limitada a 1L, podendo ser necessário reabastecê-la durante o processo, dependendo da quantidade exigida. Em seguida, foi essencial garantir a ausência de bolhas de ar na tubulação. Caso alguma seja identificada, deve ser removida. Após essa verificação, a válvula presente na estrutura de vidro da bureta deve ser aberta completamente. Essa válvula foi facilmente identificada por estar posicionada paralelamente ao fluxo do fluido de trabalho. Concomitantemente, a válvula de agulha deve ser aberta. Esse procedimento permitiu observar o fluido de trabalho fluindo da bureta em direção ao interior do aquecedor. Assim que a quantidade desejada de fluido de trabalho for transferida, iniciou-se o processo de estrangulamento da válvula para reduzir gradualmente a vazão de fluido de trabalho, até que essa seja completamente cessada. Esse processo marca a conclusão do preenchimento do protótipo de aquecedor.

Etapa #4 –Verificação dos sistemas de aquisição de dados: deve ser verificado se os termopares estavam devidamente instalados e conectados ao sistema de aquisição de dados e ao computador. Também foi necessário verificar se o sistema de aquisição de potência estava instalado e conectado.

3.2.2 Metodologia dos testes experimentais

Os testes experimentais foram conduzidos no Laboratório de Controle Térmico (LabCT) do *Campus* Ponta Grossa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, com o objetivo de reproduzir condições operacionais reais. Para isso, foi necessária a utilização de equipamentos que pudessem adequar as condições do laboratório, considerando que as condições ambientais impactam diretamente no funcionamento do dispositivo. De modo geral, foi necessário que o ambiente estivesse a uma temperatura inferior a 20°C, o que, segundo a literatura, é considerado abaixo das condições de conforto térmico.

Visando obter melhores resultados e repetibilidade nos experimentos, foi utilizada uma unidade de condicionamento de ar *Rheem*[®] do tipo *split* piso teto de 36.000 BTU/h para manter a temperatura ambiente em 16,0°C ± 1,5°C. Além disso, o aquecedor foi posicionado em um local no laboratório sem incidência de radiação solar, evitando interferências durante a realização dos testes experimentais.

Os testes experimentais foram repetidos em triplicata para cada uma das condições propostas. Cada carga térmica foi mantida por um período suficiente para

atingir a condição de regime permanente. Para manter a integridade do aparato experimental e garantir a segurança, caso a temperatura média do evaporador nos aquecedores atingisse 100°C, o sistema acionava sua proteção, desligando-se parcialmente.

Os testes foram segmentados em duas etapas, sendo a primeira investigativa, visando avaliar o funcionamento dos dispositivos e compará-los. Para isso, foi realizada uma variação gradual na potência dissipada, de acordo com as capacidades operacionais apresentadas na Tabela 1, com o objetivo de verificar o desempenho dos aquecedores diante de diferentes cargas térmicas.

Tabela 1 - Cargas térmicas aplicadas nos aquecedores

Dissipação	Carga Térmica [W]
#1	0
#2	192
#3	295
#4	487
#5	587
#6	900
#7	1.470

Fonte: Autoria própria (2024)

Na segunda etapa, foi fixada a dissipação de uma carga térmica de 900W nos aquecedores. Essa avaliação teve como objetivo comparar diferentes razões de preenchimento do protótipo ao longo de um período de 5 horas (300 minutos). Essa etapa visou avaliar o funcionamento dos aquecedores em regime estacionário, bem como sua resposta à dissipação da carga térmica. A Tabela 2 apresenta as razões de preenchimento propostas em função do volume total do protótipo.

Tabela 2 - Razões de Preenchimento para o protótipo

Razão de Preenchimento [%]	Volume de Fluido de Trabalho [mL]
40	1.140
50	1.425
60	1.710

Fonte: Autoria própria (2024)

3.2.3 Avaliação da Resistência Térmica

O desempenho térmico de um dispositivo operando através do princípio de termossifões pode ser avaliado por meio do cálculo de sua resistência térmica (R_t). Esse importante parâmetro térmico pode ser entendido como a capacidade de transferir uma quantidade de calor (q) a um determinado gradiente de temperatura entre as temperaturas médias do evaporador ($\bar{T}_e$) e do condensador ($\bar{T}_c$). Ela poder ser calculada, conforme apresentado em De Souza (2023), por meio da Equação (1):

$$R_t = \frac{\bar{T}_e - \bar{T}_c}{q}. \quad (1)$$

3.3 Análise de incertezas experimentais

Para a avaliação das incertezas experimentais, foram relacionados os instrumentos de medição utilizados e presentes na Tabela 3.

Tabela 3 - Incertezas experimentais

Parâmetro	Instrumento de Medição	Incerteza	Unidade
Comprimento	Escala milimetrada	$\pm 0,5$	mm
Diâmetro	Paquímetro	$\pm 0,025$	mm
Temperatura	Termopar do tipo K	$\pm 0,25$	°C
Volume	Bureta Graduada	$\pm 0,05$	mL

Fonte: Autoria própria (2024)

As medições experimentais devem levar a uma incerteza de medição, que estima o grau de dúvida associado ao resultado da medição. O método de propagação de incertezas descrito por Holman (2011) foi utilizado. O *software Engineering Equation Solver® (EES®)* foi usado nos cálculos. A incerteza ΔR de um resultado $R = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ com medidas em $x_1, \dots, x_n$ pode ser expressa pela Equação(2) (KLINE e McCLINTOCK, 1953):

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

3.4 Tratamento estatístico

Para a determinação dos regimes permanentes foram utilizados os conceitos de média, desvio padrão e coeficiente de determinação.

3.4.1 Média

De acordo com Moreira (1998), para calcular a média aritmética de um conjunto numérico, todos os valores presentes no conjunto são somados e, em seguida, o total é dividido pela quantidade de itens desse conjunto, conforme demonstrado na Equação (3):

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}, \quad (3)$$

em que, $\bar{x}$ é a média, n representa o número de medições do somatório e x_i é o valor correspondente de cada item.

3.4.2 Desvio padrão

Uma vez atingido o regime permanente, foi calculado o desvio padrão, que, de acordo com Wackerly *et al.* (2014), é uma medida estatística útil para entender a dispersão ou variabilidade dos dados em um conjunto, conforme demonstrado na Equação (4):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}, \quad (4)$$

em que σ é o desvio padrão, N é o número total de observações na população, x_i é cada valor individual e μ é a média da população. Quanto maior a dissipação maior a dispersão dos dados em relação à média e, quanto menor, menor dispersão e maior consistência dos dados.

3.4.3 Coeficiente de Determinação - R^2

O Coeficiente de Determinação, frequentemente representado como R^2 , é uma métrica estatística amplamente utilizada para avaliar quão bem um modelo de regressão se ajusta aos dados observados. Ele oferece *insights* sobre a proporção da variabilidade na variável dependente (resposta) que é explicada pela variável independente (preditora) no modelo, medindo a proximidade dos pontos de dados em relação à linha de regressão ajustada (HAIR *et al.*, 2019).

Esse coeficiente varia entre 0 e 1, onde 0 indica que o modelo não se ajusta aos dados e 1 indica que o modelo ajusta perfeitamente a variação. Seu cálculo é realizado através da comparação das diferenças entre os valores reais e os valores previstos pelo modelo, elevados ao quadrado, a soma dessas diferenças é então

normalizada pela soma das diferenças entre os valores reais e a média dos valores reais, esse valor normalizado é o próprio R^2 , expresso pela Equação (5):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (x - \hat{x})^2}{\sum (x - \bar{x})^2}. \quad (5)$$

sendo que, o termo no numerador da equação correlaciona os valores previstos ($\hat{x}$) e o termo no denominador refere-se à média ($\bar{x}$), fornecendo informações sobre a qualidade do ajuste do modelo aos dados.

No entanto, é importante verificar que um alto valor de R^2 não garante a causalidade entre as variáveis ou a capacidade de generalização do modelo para novos dados (MONTGOMERY *et al.*, 2012).

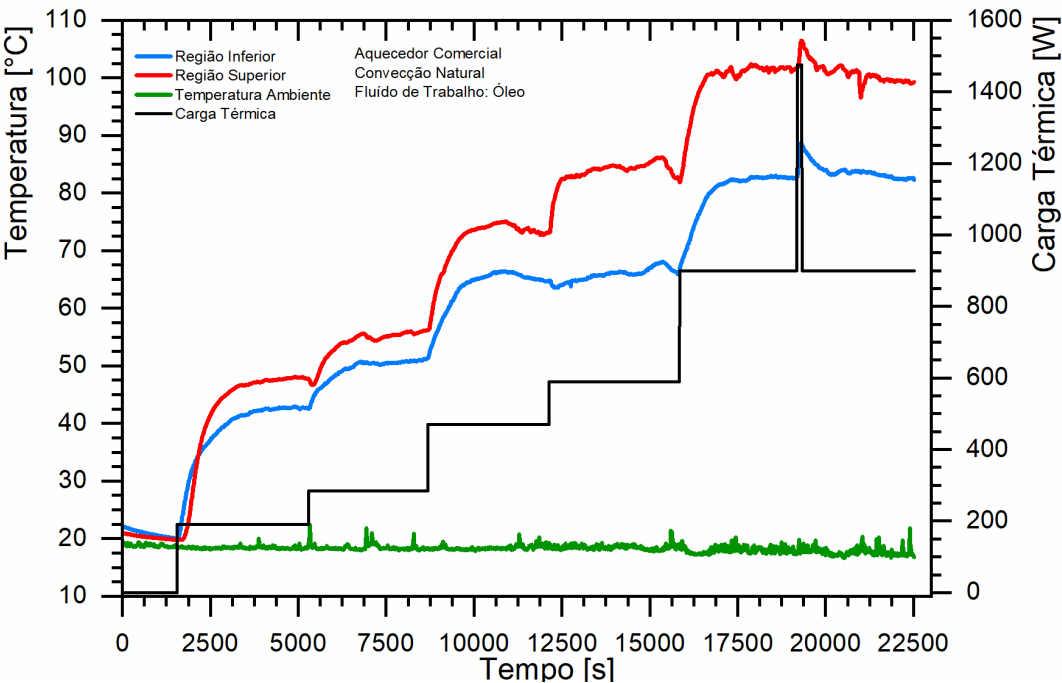
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais encontrados durante os testes dos aquecedores do tipo radiador, tanto do aquecedor comercial quanto do protótipo baseado no princípio de funcionamento de termossifões. Foram realizados testes experimentais iniciais, variando a potência conforme indicado na Tabela 1. Em seguida, foi feita a avaliação experimental do protótipo, adotando as razões de preenchimento especificadas na Tabela 2.

4.1 Aquecedor comercial

Como método de comparação, foram executados testes experimentais com o aquecedor comercial com suas configurações de fábrica. O Gráfico 2 e a Tabela 4 exibem os dados relativos às temperaturas médias dos termopares nas regiões inferior e superior, bem como da potência dissipada em função do tempo, considerando o aquecedor comercial. Pode ser observado que, devido ao emprego do processo de convecção natural, há um deslocamento do fluido de trabalho (óleo) quente em direção às regiões superiores, impulsionado pela menor massa específica do fluido de trabalho.

Gráfico 2 - Funcionamento do aquecedor comercial com convecção natural e fluido de trabalho óleo



Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 4 - Temperaturas para diferentes cargas térmicas: aquecedor comercial

Potência Real Dissipada [W]	Região Inferior [°C]	Região Superior [°C]	Gradiente Térmico [°C]
0	20,9	20,3	0,6
192	38,8	42,3	3,5
295	49,4	53,9	4,5
487	63,5	71,7	8,2
587	65,8	83,7	17,9
900	80,2	99,3	19,1
1.470	83,8	100,9	17,1

Fonte: Autoria própria (2024)

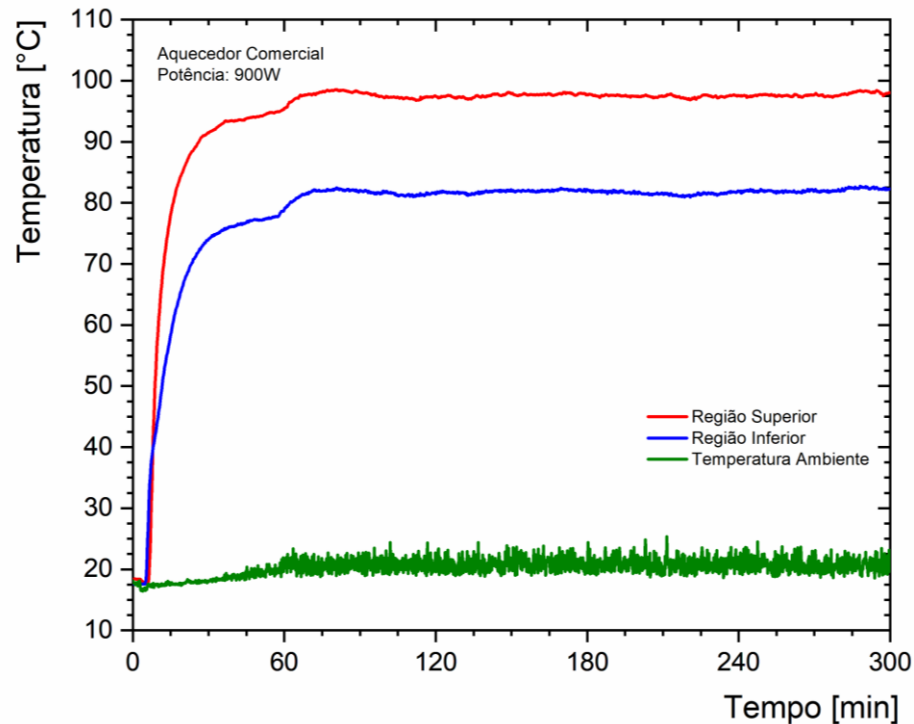
Pode ser observado ainda que um aumento na potência dissipada resulta em um aumento correspondente na temperatura média do aquecedor comercial, evidenciando também um aumento no gradiente térmico entre as regiões inferior e superior.

Finalmente, como característica de operação, quando a dissipação de potência máxima disponível na chave seletora do aquecedor comercial foi aplicada, os dispositivos de segurança presentes no equipamento foram acionados, ou seja, foi acionado um termistor que é responsável por desativar parte do resistor elétrico e fornecer a quantidade de potência do nível anterior, até que a temperatura se torne baixa o suficiente para seja ativado novamente. Tal ciclo mantém o dispositivo próximo de 100°C, definido no projeto do aquecedor comercial, como uma temperatura de trabalho aceitável e ótima visando o conforto térmico e segurança do consumidor.

Para comparação, como especificado no procedimento experimental, o aquecedor comercial foi submetido à testes experimentais adicionais, considerando uma dissipação de potência constante de 900W no resistor elétrico imerso em óleo.

O Gráfico 3 mostra como as temperaturas variam ao longo do tempo para o aquecedor comercial quando aplicada uma carga constate de 900W no resistor elétrico. A temperatura na parte superior atingiu aproximadamente de 98,0°C, enquanto na parte inferior atingiu cerca de 81,7°C após 40 minutos de operação. Além disso, é perceptível uma variação na temperatura ambiente oscilando devido as condições ambientais no laboratório, influenciada pela dissipação de calor do aquecedor comercial.

Gráfico 3 - Distribuição de temperaturas para o aquecedor comercial em teste de 5 horas

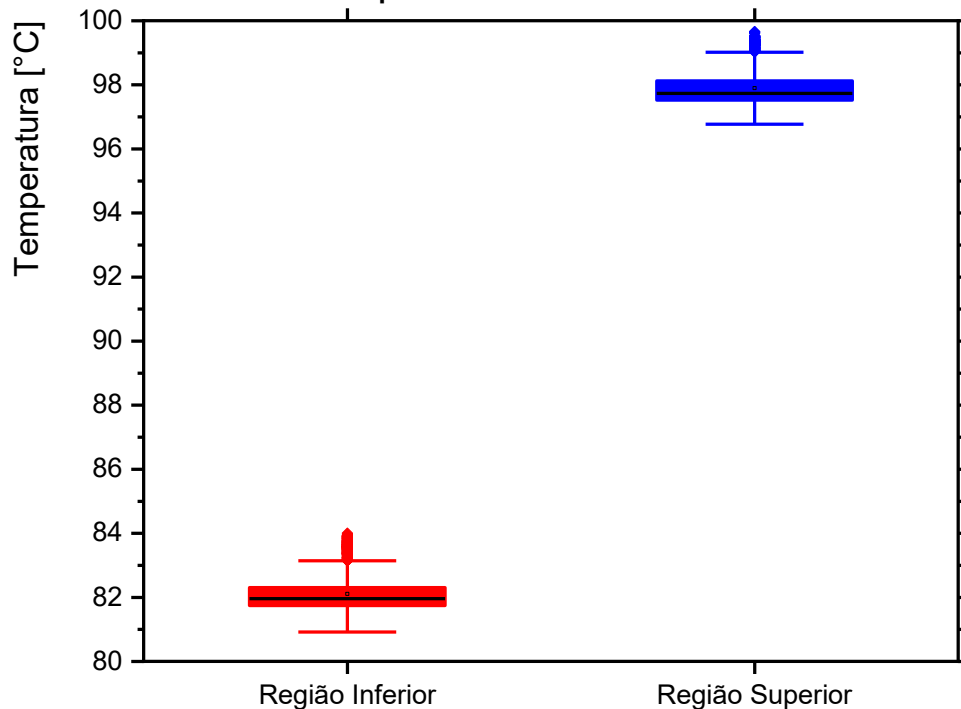


Fonte: Autoria própria (2024)

O Gráfico 4 apresenta um resumo estatístico dos dados, representado por um Diagrama *Boxplot*, mostrando uma diferença de aproximadamente 15°C entre as temperaturas nas regiões inferior e superior. A temperatura média de operação, considerando todas as medições feitas no aquecedor comercial, foi de aproximadamente 90°C. Pode ser notada uma concentração significativa de dados em torno dessa média, o que pode ser explicado pela inércia térmica do fluido de trabalho no sistema. Essa concentração reflete a tendência do sistema em manter a temperatura próxima à média de operação, devido à resposta gradual do óleo às variações térmicas.

Pode ser observado ainda que, durante o regime permanente, na região superior, a temperatura de trabalho foi de 98,0°C enquanto na região inferior a temperatura de trabalho foi de 81,7°C, sendo essa disparidade atribuída à movimentação interna do fluido de trabalho. Por meio da convecção natural, o fluido menos denso (óleo aquecido) tende a migrar para a parte superior do aquecedor do tipo radiador, enquanto na região inferior permanece o óleo com menor temperatura.

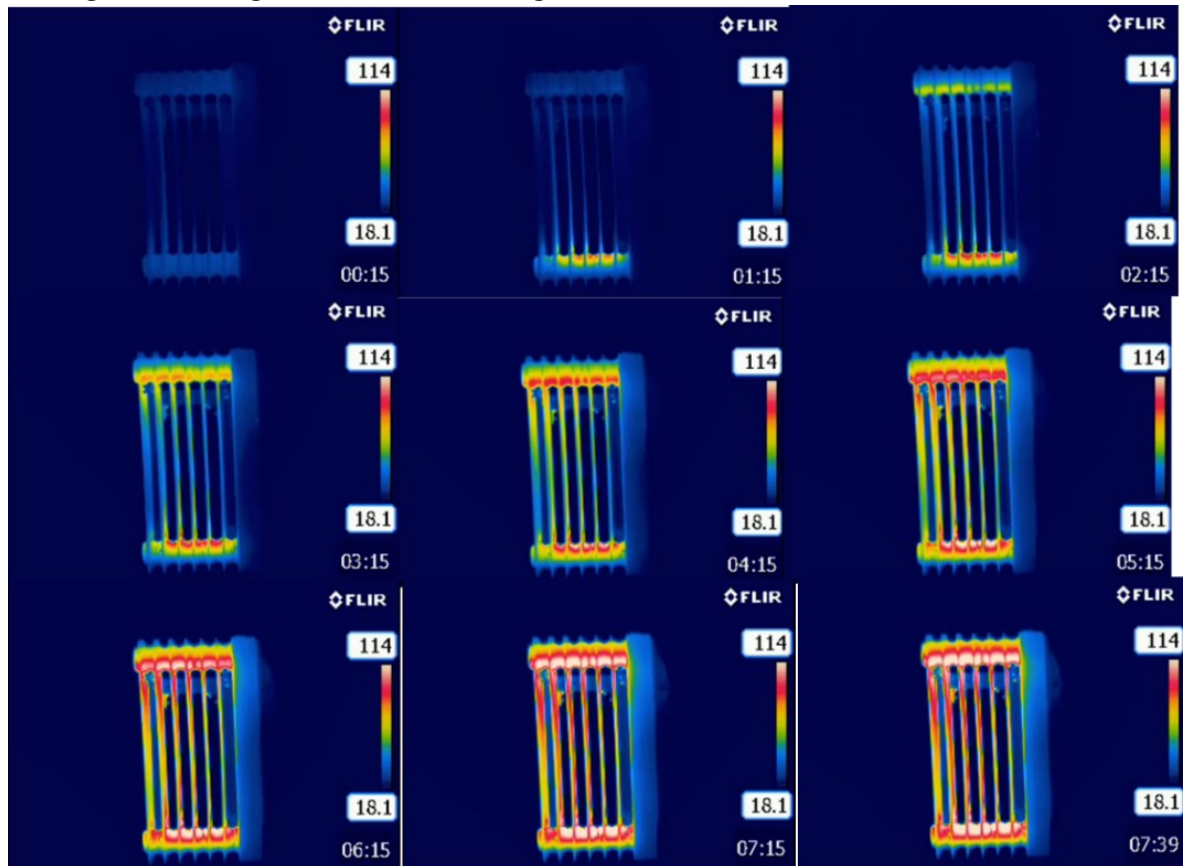
Gráfico 4 - Diagrama *boxplot* da distribuição de temperaturas em regime permanente: aquecedor comercial



Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 25 apresenta uma sequência de imagens termográficas com o passo de tempo de 1 minuto, onde foi aplicada uma de potência 1.470W com a finalidade de mostrar a distribuição de temperaturas em função do tempo no aquecedor comercial. Pode ser observado que o aquecimento se inicia na região inferior devido à posição do resistor elétrico, o qual, por meio do efeito *Joule* - fenômeno físico presente na conversão de energia elétrica em energia térmica quando há passagem de corrente elétrica - inicia o processo de difusão térmica. Esse processo envolve a transferência de calor por meio do movimento das moléculas do fluido. Com o passar do tempo, o fluido de trabalho (óleo) quente, devido à convecção natural, começa a se deslocar pelos canais. A partir do tempo 7:15, é possível observar que o aquecedor comercial atinge um estado no qual a distribuição de temperaturas estava estabilizada, caracterizada por uma região interna com temperatura mais elevada e as superfícies externas, assim como as superfícies da região dos canais do aquecedor, com temperatura mais baixa.

Figura 25 - Imagens da câmera termográfica do radiador comercial em funcionamento



Fonte: Autoria própria (2024)

Finalmente, pode ser observado que, ao atingir o regime permanente, tanto a dissipação de calor pelo resistor elétrico no dispositivo quanto a dissipação do aquecedor comercial para o ambiente superaram a temperatura de 100°C . Consequentemente, não há diferenças visuais perceptíveis nas imagens termográficas, o que impede uma análise qualitativa mais aprofundada.

4.2 Protótipo do aquecedor assistido pelo princípio de funcionamento de termossifões

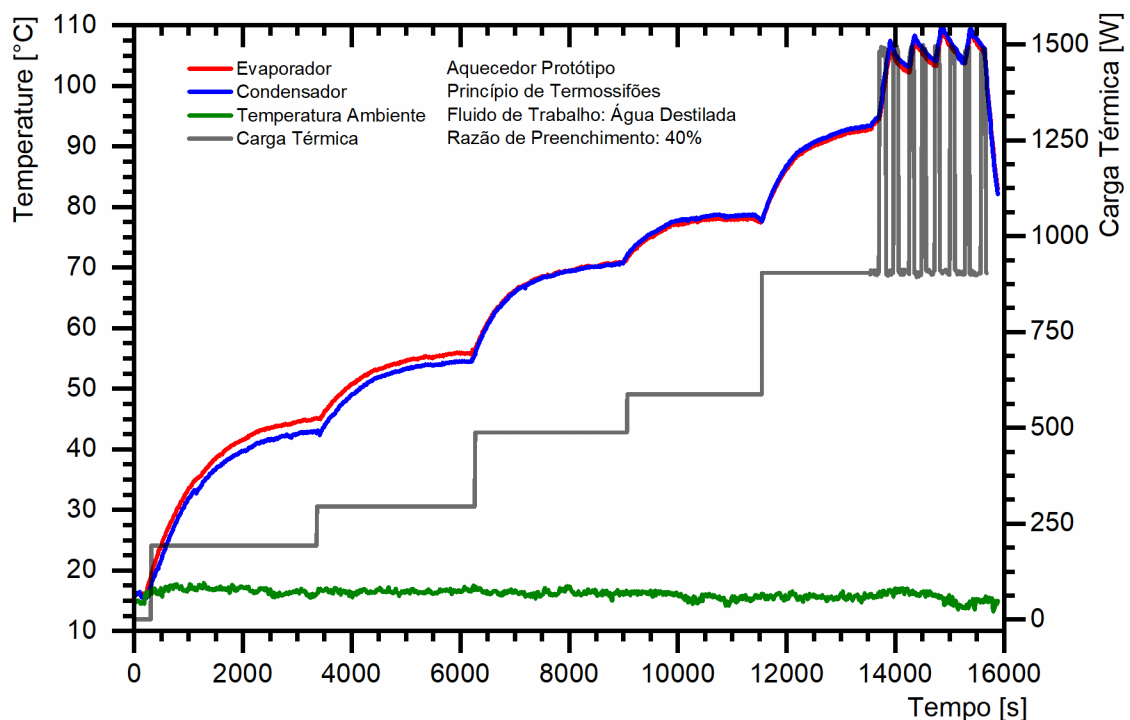
Esta seção, contém uma análise do protótipo do aquecedor assistido pelo princípio de funcionamento de termossifões, destacando as razões de preenchimento de 40%, 50% e 60%, em relação ao volume total, conforme descrito pela Tabela 2. O fluido de trabalho utilizado nos testes experimentais foi água destilada. Cada uma dessas porcentagens configura cenários específicos, influenciando o desempenho térmico do protótipo aquecedor. Além disso, são discutidas as implicações práticas de tais variações, elucidando como a seleção desse parâmetro desempenha um papel

crucial na eficiência do sistema, na transferência de calor e em outros elementos essenciais para sua operação.

4.2.1 Razão de Preenchimento de 40%

O Gráfico 5 apresenta a distribuição das temperaturas em função do tempo considerando as diferentes cargas térmicas aplicadas no protótipo de aquecedor assistido pelo princípio de termossifões com uma razão de preenchimento de 40%.

Gráfico 5 - Temperaturas e carga térmica em função do tempo para o protótipo aquecedor com 40% de fluido de trabalho



Fonte: Autoria própria (2024)

Pode ser observado que conforme há um incremento na potência dissipada há um aumento da temperatura do aquecedor. Pode ser verificado também que há uma proximidade entre as temperaturas das regiões do evaporador e do condensador corroborando para definição da condição isotérmica do protótipo.

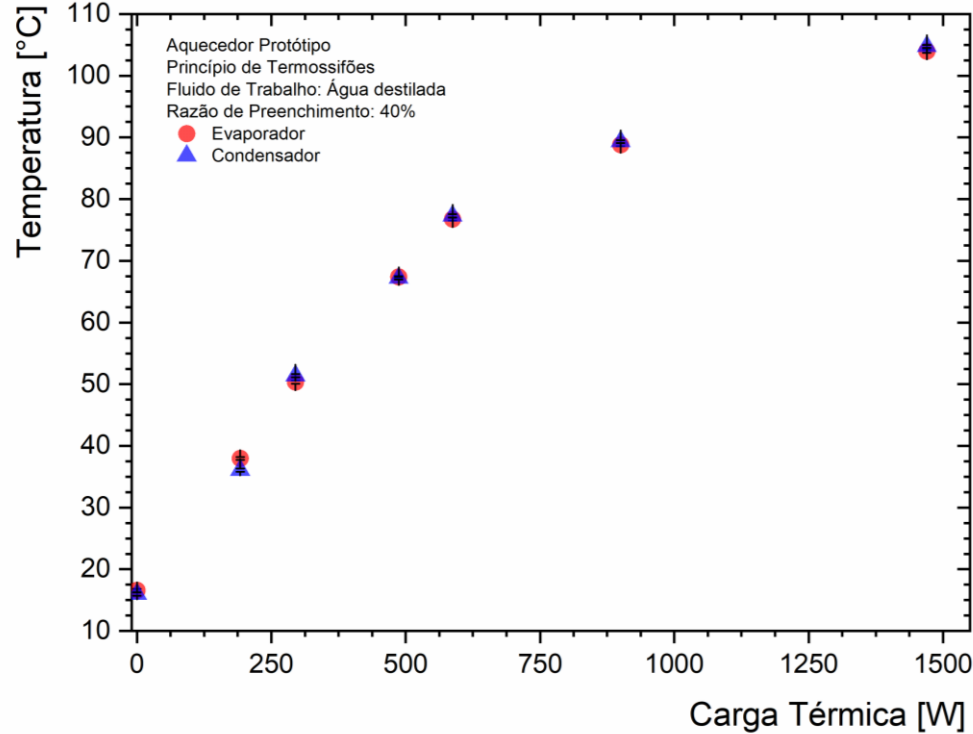
O Gráfico 6 apresenta as temperaturas médias no evaporador e no condensador no protótipo operando pelo princípio de funcionamento de termossifões considerando uma razão de preenchimento de 40%. Pode ser notado que a temperatura operacional se apresenta homogênea em todo dispositivo, apresentando um gradiente térmico entre as regiões do evaporador e condensador inferior a 2°C, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Temperaturas médias no protótipo considerando RP 40%

Potência Real Dissipada [W]	Evaporador [°C]	Condensador [°C]	Gradiente Térmico [°C]
0	16,6	16,0	0,6
192	38,0	36,1	1,9
295	52,9	51,4	1,5
487	67,4	67,2	0,2
587	76,8	77,3	0,5
900	88,8	89,3	0,5
1.470	104,0	104,8	0,8

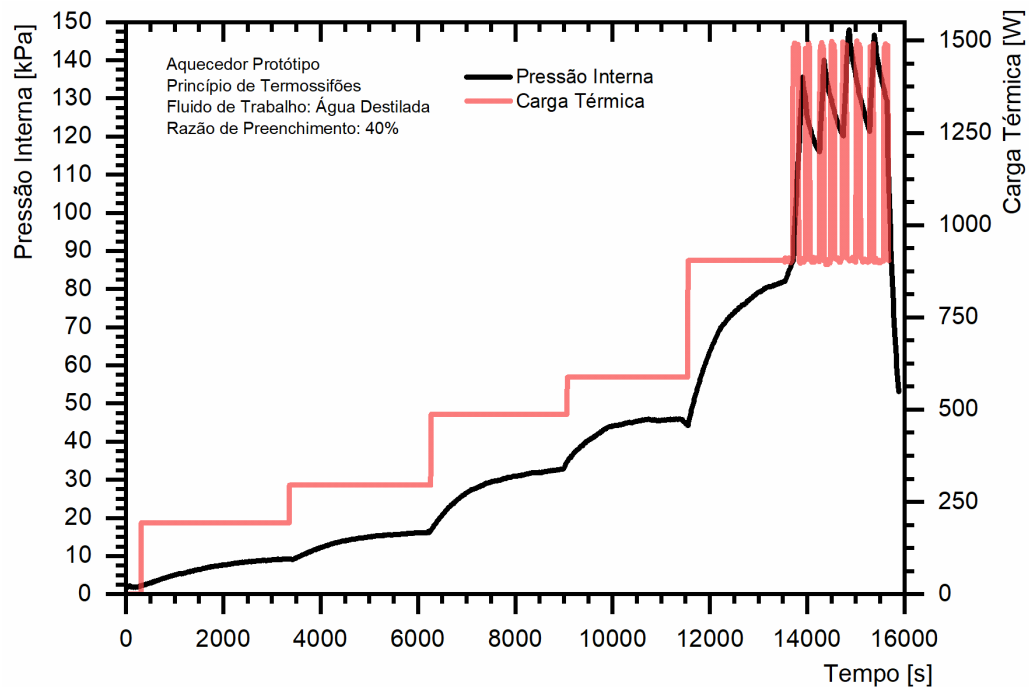
Fonte: Autoria própria (2024)

Gráfico 6 - Temperatura média em função da carga térmica para o protótipo 40%



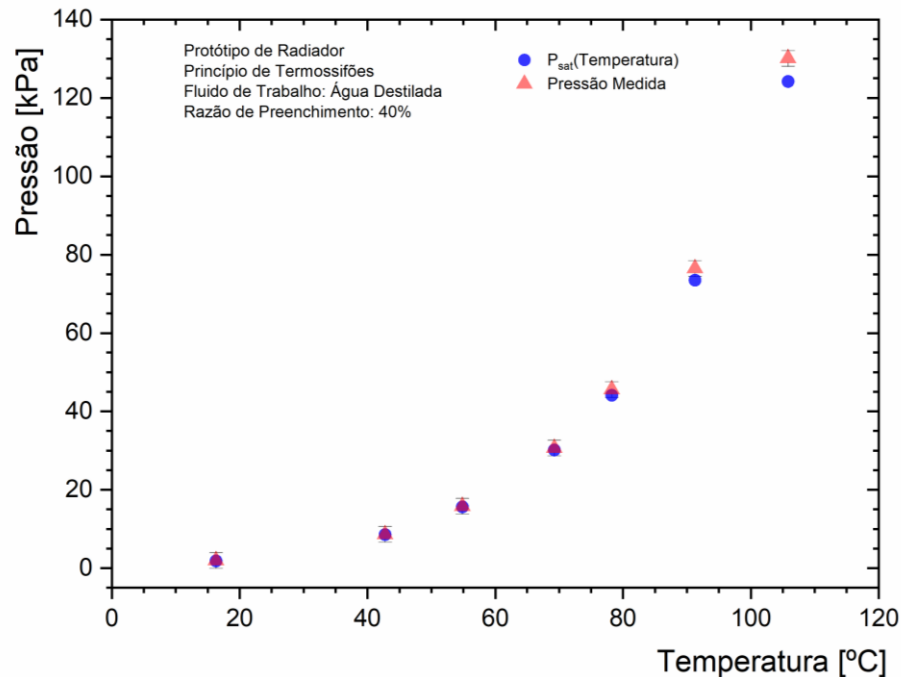
Fonte: Autoria própria (2024)

O comportamento da pressão interna em resposta à carga térmica aplicada no protótipo aquecedor em função do tempo, pode ser avaliado no Gráfico 7. Como é de conhecimento, durante as trocas térmicas em processos que usam calor latente de vaporização, as temperaturas permanecem constantes. Porém, é importante destacar que as propriedades específicas do fluido de trabalho têm um papel crucial na pressão de saturação, que pode variar de forma diferente em resposta às mudanças de temperatura.

Gráfico 7 - Pressão interna e carga térmica em função do tempo para o protótipo 40%

Pode ser observado que a pressão interna possui uma tendência similar ao comportamento da temperatura. Conforme a carga térmica dissipada aumenta, a pressão interna também aumenta, mostrando que ambos são diretamente correlacionados, corroborando com as informações da literatura. Na última faixa de dissipação de potência, 1.470W, a pressão interna acompanha o ciclo de funcionamento da carga térmica dissipada que varia devido à ativação do sistema de segurança do dispositivo.

O Gráfico 8 fornece uma comparação entre a pressão interna medida pelo transdutor de pressão e a pressão de saturação calculada com base na temperatura média do protótipo durante os testes experimentais. Os dados apresentados na Tabela 6 mostram uma convergência entre os valores dos dados de pressão interna medidos com os valores de pressão de saturação obtidos através de tabelas termodinâmicas, sendo que a maior discrepância entre o valor medido e o valor calculado apresenta uma diferença de aproximadamente 5%.

Gráfico 8 - Relação entre pressão interna e temperatura de saturação no protótipo 40%

Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 6 - Comportamento da pressão interna no protótipo 40%

Temperatura Média no Evaporador [°C]	Pressão de Saturação [kPa]	Pressão Aferida [kPa]
16,6	1,85	1,94
38,0	8,53	8,60
52,9	15,64	15,79
67,4	30,17	30,63
76,8	44,10	45,58
88,8	73,48	76,48
104,0	124,20	130,11

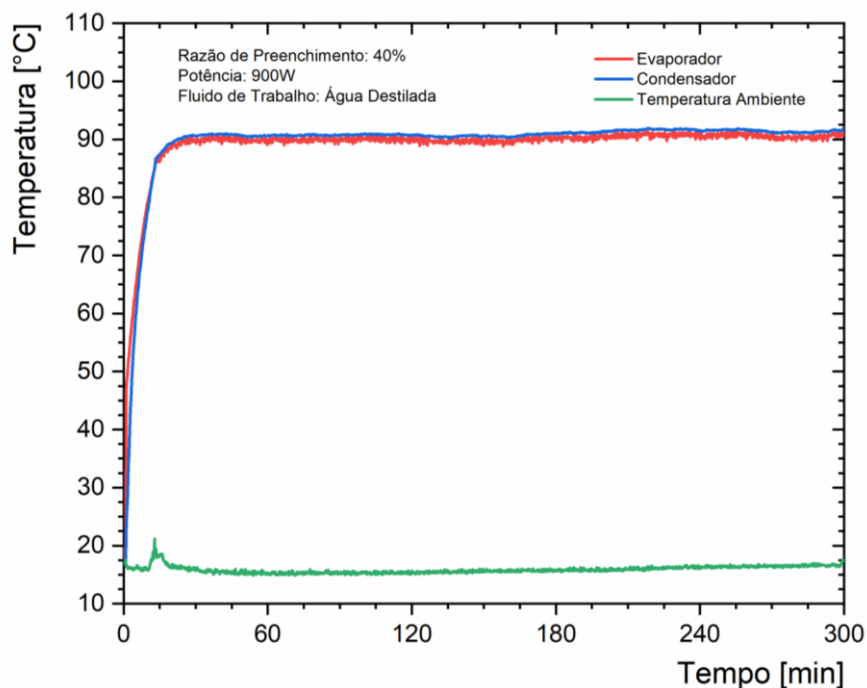
Fonte: Autoria própria (2024)

Levando em consideração aspectos como o gradiente térmico, a pressão interna e a temperatura de operação, pode ser evidenciado que a dissipação de potência de 900W é a mais apropriada como parâmetro de referência para os testes experimentais subsequentes, pois em dissipações de cargas térmicas maiores há a possibilidade de acionamento do sistema de proteção e com isso influenciará diretamente a potência dissipada e por consequência a temperatura de operação do aquecedor do tipo radiador.

O Gráfico 9 ilustra a distribuição da temperatura média nas regiões do evaporador e do condensador em função do tempo considerando o protótipo com

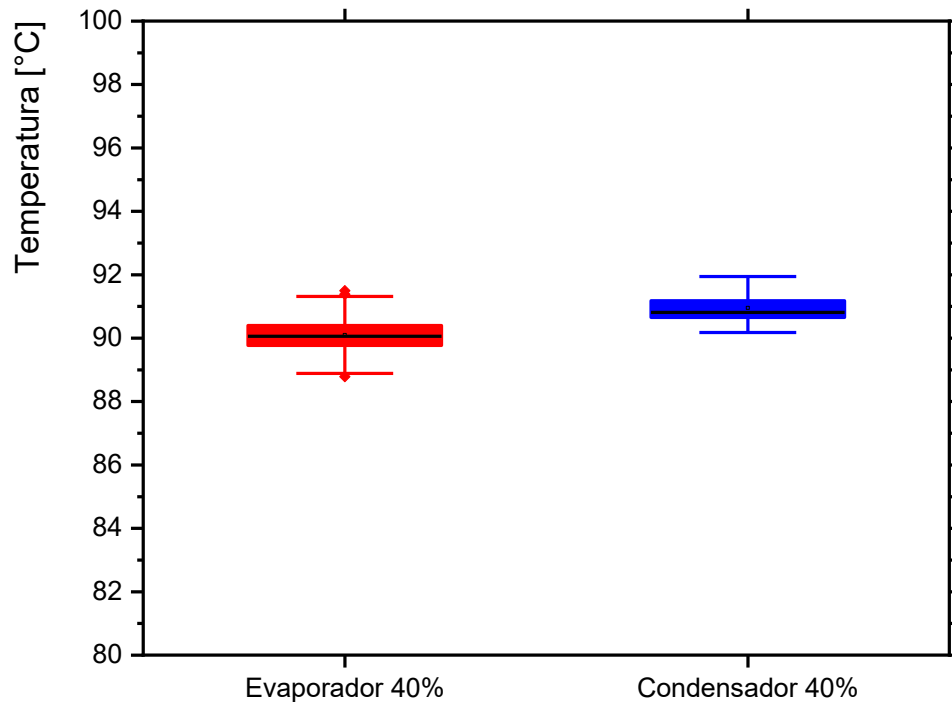
carregamento de fluido de trabalho de 40% de seu volume total. Pode ser observado que, após aproximadamente 15 minutos, o aquecedor atinge uma temperatura média em torno de 90,5°C. Durante a avaliação do regime permanente, pode ser notado que as temperaturas permanecem praticamente constantes. Além disso, pode ser observado que as diferenças de temperatura entre o evaporador e o condensador estão dentro de uma faixa de $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$, demonstrado assim uma condição isotérmica durante o funcionamento.

Gráfico 9 - Distribuição de temperaturas em função do tempo para o protótipo com razão de preenchimento de 40%



Fonte: Autoria própria (2024)

O Gráfico 10 é um Diagrama *Boxplot* que fornece uma visão resumida da distribuição de um conjunto de dados e ilustra a estabilidade das temperaturas ao longo do tempo durante o regime permanente de funcionamento do protótipo operando com uma razão de preenchimento de 40%. Pode ser notado que a distribuição de temperaturas ao longo do regime permanente estão próximas à media, com uma variação devido às trocas térmicas que ocorrem. É possível inferir que a temperatura característica do protótipo do aquecedor do tipo radiador durante o regime permanente é de aproximadamente 90,5°C. Para a região do evaporador os dados estão em um intervalo de aproximadamente 2,5°C e para a região do condensador dentro de aproximadamente 2,0°C, o que indica uma estabilidade térmica e excelente homogeneidade entendido também como condição isotérmica.

Gráfico 10 - Distribuição de temperaturas em regime permanente para o protótipo 40%

Fonte: Autoria própria (2024)

A Tabela 7 apresenta informações obtidas nos testes experimentais com o protótipo de aquecedor do tipo radiador com razão de preenchimento de 40% incluindo a temperatura média dos termopares, a pressão interna média, a temperatura de saturação em função da pressão aferida (com uma diferença de 3% em relação à temperatura de operação) e o consumo de energia elétrica considerando o período em análise.

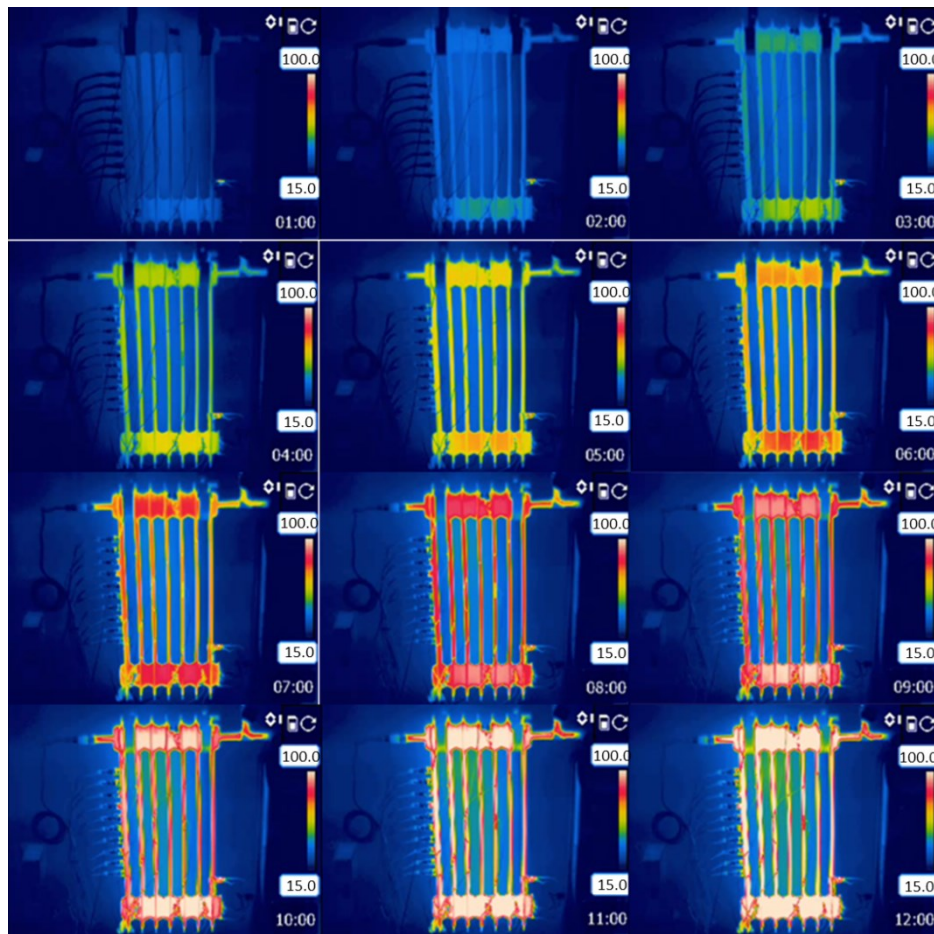
Tabela 7 - Temperatura média, pressão interna média e consumo do protótipo RP 40%

$\bar{T}_{RP40\%}$ [°C]	$\bar{P}_{RP40\%}$ [kPa]	$T_{sat}(\bar{P}_{RP40\%})$ [°C]	Consumo [kWh]
90,52 ± 0,25	79,28 ± 2,00	93,27	4,5

Fonte: Autoria própria (2024)

E, por fim, a Figura 26 ilustra uma sequência de imagens termográficas, com o passo de tempo de 1 minuto, mostrando o comportamento térmico do protótipo de aquecedor do tipo radiador assistido pelo princípio de funcionamento de termossifões, utilizando uma razão de preenchimento de 40%. Essa análise qualitativa do dispositivo foi conduzida considerando a dissipação de potência uniforme de 1500W evidenciando uma distribuição uniforme da temperatura ao longo do tempo. Esse resultado fortalece as tendências identificadas nas avaliações anteriores.

Figura 26 - Imagens termográficas no protótipo com razão de preenchimento de 40%



Fonte: Autoria própria (2024)

Durante a fase inicial, que vai até os primeiros 6 minutos, pode ser observado um aumento gradual da temperatura na região do evaporador, indicado pelas tonalidades de verde, passando pelo amarelo, laranja e chegando ao vermelho. Em seguida, o fluido de trabalho (água) é direcionado pelos canais intermediários, exibindo duas características distintas. Em alguns momentos, sua coloração difere daquela das regiões do evaporador e do condensador, possivelmente devido às características de aletas nessa região. Em outros casos, a coloração tende a se aproximar do laranja, sugerindo uma região caótica com um fluxo mais intenso do fluido condensado.

Essa movimentação caótica, conforme descrita na literatura, é comumente observada em sistemas onde ocorre a ebulição devido à formação de bolhas. Essas bolhas podem se mover de forma irregular e imprevisível devido a vários fatores, incluindo a turbulência do fluido circundante, a presença de obstáculos no caminho das bolhas e as complexas interações entre as bolhas e o líquido.

A movimentação caótica das bolhas pode resultar em uma distribuição não uniforme da temperatura e do fluxo de calor no sistema. Em algumas áreas, onde há uma maior concentração de bolhas, a dissipação de calor pode ser mais eficiente, enquanto em outras áreas, onde a movimentação das bolhas é mais restrita, o calor pode se acumular, levando a gradientes de temperatura significativos.

Outro fenômeno correlacionado é o *Geyser Boiling*, um fenômeno onde pequenas bolhas de vapor se formam na piscina de líquido e que após coalescerem causam uma liberação repentina de vapor e líquido que ascende em elevada velocidade (OLIVEIRA *et al.*, 2021). Em trocadores de calor, esse fenômeno causa uma ebulição instável e pulsante em áreas específicas, causando variações significativas na transferência de calor. De acordo com Mantelli (2021) esse fenômeno pode afetar a eficiência e desempenho térmico do trocador de calor.

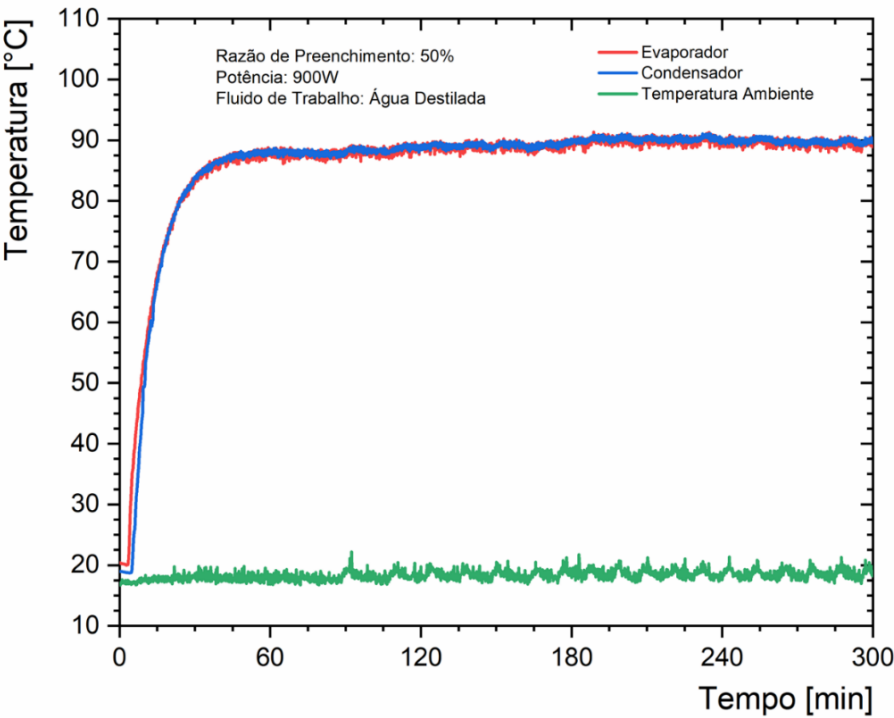
4.2.2 Razão de Preenchimento de 50%

Nesta seção são apresentados os testes experimentais do protótipo do aquecedor do tipo radiador considerando uma razão de preenchimento de 50% e uma dissipação de potência constante de 900W durante um período de 300 minutos.

O Gráfico 11 exibe o comportamento da distribuição das temperaturas médias no evaporador e no condensador em função do tempo para o protótipo aquecedor considerando essas novas condições operacionais simuladas em laboratório.

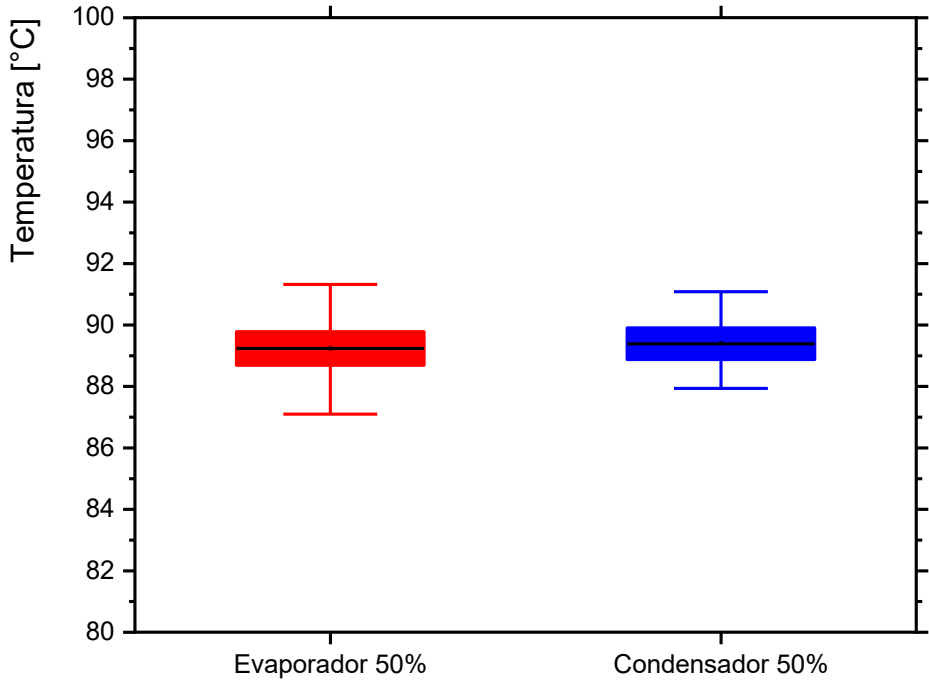
O Gráfico 12 apresenta os dados estatísticos de resumo da distribuição, ou também denominado Diagrama *Boxplot*, que ilustra a dispersão dos dados durante o regime permanente. É possível notar uma concentração dos dados em torno da média, sendo para o evaporador um valor médio de aproximadamente 88,9°C e para o condensador de aproximadamente 89,1°C, indicando uma distribuição normal característica, conforme observado nos testes experimentais considerando o protótipo com uma razão de preenchimento de 40%.

Gráfico 11 - Distribuição de temperaturas para o protótipo com razão de preenchimento de 50%



Fonte: Autoria própria (2024)

Gráfico 12 - Distribuição de temperaturas para o protótipo com 50%



Fonte: Autoria própria (2024)

Pode ser observado que a identificação da condição isotérmica é evidenciada pela menor diferença entre as temperaturas médias do evaporador e do condensador em comparação com as temperaturas apresentadas no Gráfico 10. No entanto, esses

dados estão contidos em uma faixa de até 5,5°C, indicando uma variação térmica na temperatura operacional do dispositivo.

É possível notar ainda que o tempo para atingir o regime permanente é de cerca de 35 minutos, o que significa um aumento de 130% em relação ao caso anterior, considerando uma razão de preenchimento de 40% do protótipo. Isso se deve à presença de uma quantidade maior de fluido de trabalho, o que requer mais tempo para iniciar o ciclo bifásico devido à inércia térmica.

A Tabela 8 apresenta as informações referentes ao protótipo com uma razão de preenchimento de 50% estabelecendo uma comparação entre a temperatura operacional média, a temperatura de saturação estimada a partir da pressão interna média e o consumo de energia durante o regime permanente, pode ser verificado uma diferença de 4,0°C, representando uma variação inferior a 5%.

Tabela 8 - Dados regime permanente RP 50%

$\bar{T}_{RP50\%}$ [°C]	$\bar{P}_{RP50\%}$ [kPa]	$T_{sat}(\bar{P}_{RP50\%})$ [°C]	Consumo [kWh]
86,64 ± 0,25	73,37 ± 2,00	91,20	4,5

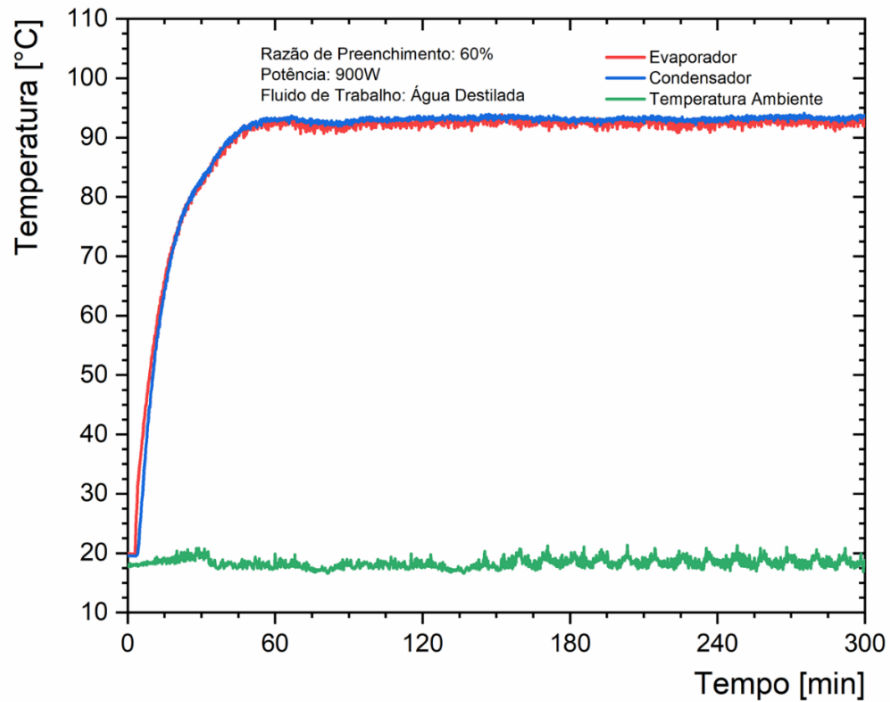
Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.3 Razão de Preenchimento de 60%

Nesta seção, apresentamos os resultados dos testes experimentais realizados com um protótipo de aquecedor do tipo radiador, que utiliza o princípio de funcionamento dos termossifões e possui uma razão de preenchimento de 60% do seu volume total.

O Gráfico 13 ilustra a distribuição das temperaturas médias no evaporador e no condensador, ao longo do tempo, para o protótipo. Pode ser notado que o tempo para atingir o regime permanente foi de aproximadamente 55 minutos e, assim como nos casos anteriores, há uma proximidade entre as temperaturas médias das regiões do evaporador (aproximadamente 92,5°C) e do condensador (aproximadamente 93,1°C), caracterizando uma condição isotérmica do aquecedor do tipo radiador.

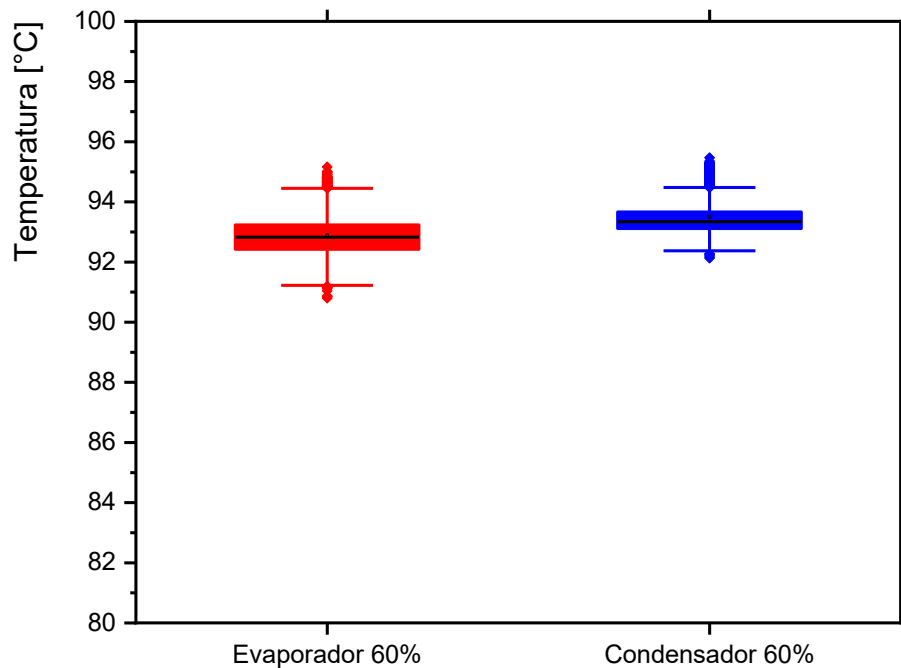
Gráfico 13 - Distribuição de temperaturas para o protótipo 60%



Fonte: Autoria própria (2024)

O Gráfico 14 apresenta os dados estatísticos da distribuição de temperaturas (Diagrama *Boxplot*), para a configuração do protótipo de aquecedor com razão de preenchimento de 60%, ilustrando a dispersão dos dados durante o regime permanente.

Gráfico 14 - Distribuição de temperaturas em regime permanente para o protótipo 60%



Fonte: Autoria própria (2024)

Pode ser observado que a temperatura média das regiões é a maior quando comparada aos casos anteriores (razões de preenchimento de 40% e 50%) e que os dados apresentam maior concentração, estando localizados em um intervalo de 3°C o que indica uma estabilidade térmica nessa configuração específica. No entanto, esse protótipo aquecedor leva mais tempo para alcançar o regime permanente, mesmo em comparação com o aquecedor comercial.

A Tabela 9 apresenta as informações referentes à razão de preenchimento de 60% estabelecendo uma comparação entre a temperatura operacional média, a temperatura de saturação estimada a partir da pressão interna média e o consumo de energia durante o regime permanente, pode ser verificado uma diferença de aproximadamente 2°C, representando uma variação inferior a 3%.

Tabela 9 - Dados regime permanente RP 60%

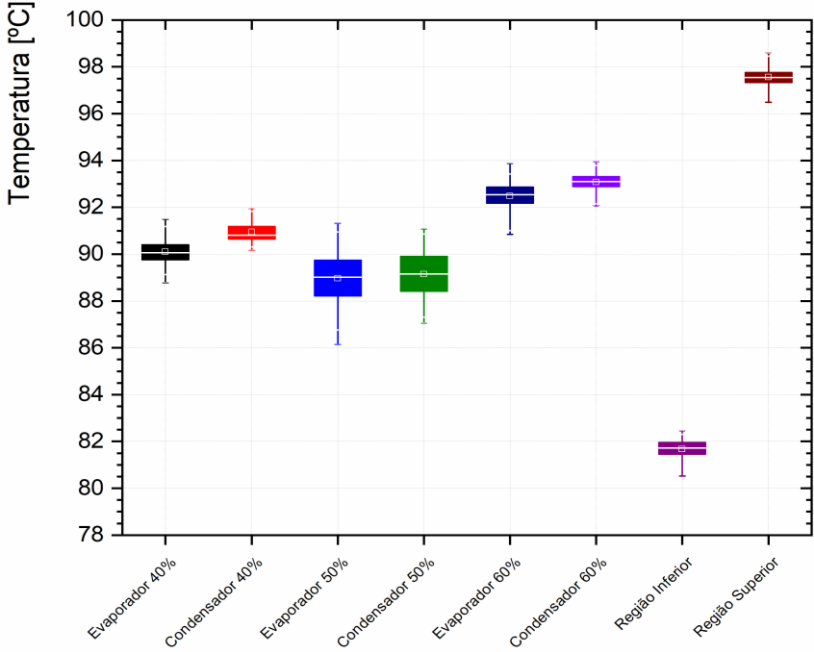
$\bar{T}_{RP60\%} [^{\circ}\text{C}]$	$\bar{P}_{RP60\%} [\text{kPa}]$	$T_{\text{sat}}(\bar{P}_{RP60\%}) [^{\circ}\text{C}]$	Consumo [kWh]
93,13± 0,25	84,91± 2,00	95,12	4,5

Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.4 Comparativo entre os aquecedores

O Gráfico 15 sintetiza as informações anteriormente expostas, visando comparar as distribuições das temperaturas médias em diferentes regiões dos aquecedores, quando dissipada uma carga térmica constante de 900W durante um período de regime permanente de 300 minutos. Os casos são apresentados em sequência, iniciando com os dados do protótipo do aquecedor do tipo radiador com uma razão de preenchimento de 40%, seguido por razões de preenchimento de 50% e 60%, e, por fim, pelos dados do aquecedor comercial.

Gráfico 15 - Distribuição de temperaturas para as diferentes configurações



Fonte: Autoria própria (2024)

Algumas características podem ser destacadas: a região superior do aquecedor comercial exibe a temperatura média mais elevada, enquanto a região inferior demonstra a temperatura média mais baixa registrada durante os testes experimentais. As temperaturas médias do protótipo situaram-se em um intervalo inferior a 6°C, o que lhe confere uma condição isotérmica, indicando a homogeneidade térmica do dispositivo, o que é corroborado pela literatura, tendo em vista o fenômeno físico do princípio de funcionamento de termossifões.

Tabela 10 - Dados de tempos dos aquecedores

Caso	Tempo para aproximado para o Regime Permanente [min]
Aquecedor Comercial	40
Protótipo com RP 40%	15
Protótipo com RP 50%	35
Protótipo com RP 60%	55

Fonte: Autoria própria (2024)

E, finalmente, quando se comparam os tempos para atingir o regime permanente, Tabela 10, pode ser observado que o protótipo aquecedor do tipo radiador apresenta os menores tempos, com destaque para o dispositivo com razão de preenchimento de 40% que precisa de 15 minutos.

Quando se avaliam as temperaturas médias dos dispositivos, conforme apresentado na Tabela 11, é possível verificar que a variação entre a maior

temperatura média (protótipo com razão de preenchimento de 60%) e a menor temperatura média (protótipo com razão de preenchimento de 50%) é de 3,8°C entre os casos propostos. Além disso, ao comparar os dados entre o aquecedor comercial e o protótipo com razão de preenchimento de 40%, levando em consideração o erro experimental, é possível afirmar que apresentam temperaturas operacionais equivalentes.

Tabela 11 - Dados de temperatura média dos aquecedores

Caso	Temperatura média em regime permanente [°C]
Aquecedor Comercial	89,9
Protótipo com RP 40%	90,5
Protótipo com RP 50%	89,0
Protótipo com RP 60%	92,8

Fonte: Autoria própria (2024)

A Tabela 12 apresenta os resultados experimentais encontrados para o gradiente térmico e para a resistência térmica (R_t) dos aquecedores. Esses resultados mostraram que o aquecedor comercial apresentou um gradiente térmico de 19,1°C e uma resistência térmica de 0,02120°C/W, indicando uma menor eficiência na dissipação de calor em comparação com os protótipos aquecedores do tipo radiador com razões de preenchimento de 40%, 50% e 60%, que demonstraram desempenhos térmicos superiores.

Tabela 12 - Avaliação da resistência térmica para os aquecedores

Caso	Gradiente Térmico [°C]	Resistência Térmica Experimental [°C/W]
Aquecedor Comercial	19,1	0,02120
Protótipo com RP 40%	0,50	0,00056
Protótipo com RP 50%	0,20	0,00022
Protótipo com RP 60%	0,60	0,00067

Fonte: Autoria própria (2024)

Mantelli (2021) afirmou que a otimização da resistência térmica pode levar a melhorias substanciais na eficiência operacional dos termossifões. Por exemplo, uma menor resistência térmica facilita a transferência de calor por convecção natural, essencial para o funcionamento eficiente dos termossifões.

5 CONCLUSÕES

A presente Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica abordou uma avaliação experimental de aquecedores do tipo radiador, operando com distintos mecanismos de transferência de calor. O primeiro, aquecedor comercial, emprega convecção natural com óleo como fluido de trabalho, preenchendo todo o volume interno do equipamento. O segundo, um protótipo de aquecedor assistido pelo princípio de funcionamento de termossifões, utilizando água destilada como fluido de trabalho em diferentes razões de preenchimento. Ambos os dispositivos possuem geometria idêntica, construída em aço carbono e foram alimentados por um resistor elétrico de imersão.

Ao entender o funcionamento do dispositivo mediante o aumento progressivo da potência dissipada, realizando uma rampa de carga térmica, pode ser concluído que uma dissipação térmica de 900W seria mais adequada para a análise experimental comparativa. Isso se deve ao fato de que dissipações mais elevadas poderiam causar o desarme do dispositivo através do acionamento de seu sistema de segurança.

Devido à operação desses diferentes dispositivos ocorrer no mesmo período e da utilização de resistores elétricos iguais, com o mesmo consumo energético de 4,5kWh quando aplicada uma carga térmica constante de 900W durante um período de 300minutos, a discussão foi concentrada nas temperaturas médias de operação, homogeneidade, tempo de resposta e estabilidade térmica.

Dessa forma, foi possível observar que o protótipo de aquecedor do tipo radiador apresentou uma temperatura média semelhante em comparação com o aquecedor comercial. Entretanto, o protótipo exibiu uma homogeneidade que se traduz em um menor gradiente térmico entre as regiões do evaporador e do condensador em torno de 3°C, enquanto o aquecedor comercial apresentou um gradiente térmico entre as regiões inferior e superior de 15°C. Essa característica está em consonância com a literatura, visto que o princípio de funcionamento de termossifões oferece tal benefício.

Ao comparar as diferentes razões de preenchimento (40%, 50% e 60%), foi observado que as temperaturas médias são próximas entre si. A principal diferença entre elas está no tempo necessário para atingir o regime permanente, que foi de 15minutos, 35minutos e 55minutos, respectivamente, para cada uma das razões de

preenchimento. Esse tempo está diretamente relacionado ao volume de fluido de trabalho presente em cada configuração.

Em geral, o protótipo do aquecedor do tipo radiador atingiu o regime permanente de forma mais rápida em quase todas as situações propostas do que o aquecedor comercial. Além disso, apresenta uma temperatura média de operação em torno de 90°C.

Portanto, pode ser concluído que esse estudo experimental revelou que o protótipo testado é promissor e viável para uso em ambientes domésticos. Destaca-se o benefício ambiental do uso de água destilada em vez de óleo, visando mitigar impactos ambientais ao longo do tempo de uso do dispositivo.

Finalmente, ressalta-se que essa pesquisa contribui para a ciência ao apresentar resultados experimentais consistentes com a literatura, fornecendo suporte para investigações futuras.

REFERÊNCIAS

ABDULLAHI, B.; K. AL-DADAH, R.; MAHMOUD, S. **Thermosyphon heat pipe technology**. In: Recent Advances in Heat Pipes. [s.l.] IntechOpen, 2019.

ALMEIDA, F. S. *et al.* Viabilidade da aplicação de termossifão bifásico para resfriamento passivo de ambientes interno. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 14, n. 00, p. e023021, 2023. <https://doi.org/10.20396/parc.v14i00.8672200>

ANSI/ASHRAE Standard 93-2003. **Methods of Testing to Determine Thermal Performance of Solar Collectors**, ISSN: 1041-2336, ASHRAE, Inc., 1791 Tullie Circle, Ne, Atlanta, GA30329, 2003.

AVE-MARIA, Bíblia Sagrada. Edição de estudos. **São Paulo: Editora Ave Maria**, 1959.

BERGMAN, T.; LAVINE, A. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 8a Edição ed. Grupo GEN, 2019.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**. Editora Blucher, 2018.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa**. Amgh Editora, 2009.

DE SOUZA, F. G. *et al.*, Geyser boiling experiments in thermosyphons filled with immiscible working fluids. **International Journal of Thermal Sciences**, 185, 108066, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.108066>

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 5ª Edição. [S. l.]: São Paulo : Studio Nobel, 2001.

HAIR, J. F. *et al.*, **Multivariate Data Analysis**. 8th ed. Cengage Learning, 2019.

HAN, X; WANG, Y. Experimental investigation of the thermal performance of a novel concentric tube heat pipe heat exchanger. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, School of Chemistry and Chemical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China, vol. 127, p. 1338–1342, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.116>.

JOUHARA, H; *et al.*, **Heat pipe based systems - Advances and applications**. Energy, Institute of Energy Futures, Brunel University London, Uxbridge, Middlesex, London UB8 3PH, United Kingdom, vol. 128, p. 729–754, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.028>.

JOUHARA, H.; MERCHANT, H. Experimental investigation of a thermosyphon based heat exchanger used in energy efficient air handling units. **Energy**, vol. 39, no. 1, p. 82–89, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.054>

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.

KRAMBECK, L., DOMICIANO, K.G., MANTELLI, M.B.H. A new flat electronics cooling device composed of internal parallel loop heat pipes. **Experimental and Computational Multiphase Flow**, 277–286, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42757-024-0187-0>

DOMICIANO, K. G. *et al.*, Study of a new thin flat loop heat pipe for electronics. **Heat and Mass Transfer**, 59(11), 2035-2056, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00231-023-03381-9>

LAMBERTS, R. **Desempenho térmico em edificações**. Universidade Federal de Santa Catarina, vol. 7º, p. 239, 2016.

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

MANTELLI, M. B. H. Heat pipes and solid sorption transformations - fundamentals and practical applications. In: 1. ed. United States: CRC Press, 2013. cap. Thermosyphon Technology for Industrial Applications, p. 411–464.
MANTELLI, M.B.H. **Thermosyphons and Heat Pipes**: Theory and Applications. Springer International Publishing, 2021.

MONDIAL. **Aquecedor a Óleo Mondial A-06**. Disponível em: <<https://www.emondial.com.br/aquecedor-a-oleo-mondial-a-06/p>>. Acesso em: 2jun. 2023.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to Linear Regression Analysis**. John Wiley& Sons, 2012.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, Howard N. **Fundamentos de termodinâmica técnica**. Reverté, 2018.

MOREIRA, D. **Introdução à administração da produção e operações**. São Paulo: Pioneira, 1998.

NADA, S.A.; EL-GHETANY, H.H.; HUSSEIN, H.M.S. Performance of a two-phase closed thermosyphon solar collector with a shell and tube heat exchanger. **Applied Thermal Engineering**, vol. 24, no. 13, p. 1959–1968, 2004. <https://doi.org/DOI.10.1016/j.applthermaleng.2003.12.015>.

NARESH, Y.; BALAJI, C. **Thermal performance of an internally finned two phase closed thermosyphon with refrigerant R134a: A combined experimental and**

numerical study. International Journal of Thermal Sciences, vol. 126, no. July 2017, p. 281–293, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.11.033>.

OLIVEIRA, D. S. D. *et al.*, Experimental study of hydrodynamic parameters regarding on geyser boiling phenomenon in glass thermosyphon using wire-mesh sensor. **Thermal Science**, vol. 26, no. 2 part B, p. 1391–1404, 2022. <https://doi.org/10.2298/TSCI201008221O>

PARAMETTHANUWAT, *et al.*, Heat transfer characteristics of closed-end thermosyphon (CE-TPCT). **Engineering Science and Technology, an International Journal**, Heat Pipe and Nanofluid Technology Research Unit, Faculty of Industrial Technology and Management, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 2021. DOI 10.1016/j.jestch.2021.05.024..

POTTER, M. C.; SOMERTON, C. W. **Termodinâmica para Engenheiros**. Bookman Editora, 2017.

RESIDAL. **Resistência elétrica tubular de imersão**. Disponível em: <<https://www.residalresistencias.com.br/resistencia-eletrica-tubular-imersao>>. Acesso em: 2 jun. 2023.

REAY, D. A.; KEW, P. A.; MCGLEN, R. J. **Heat pipes: theory, design and applications**. Waltham, MA, USA: Elsevier, 2014

SAHIN, F.; NAMLI, L. Thermal performances and stabilities of nanofluids in an electrical oil heater. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2020.doi:10.1007/s10973-020-09826-1

SARMIENTO, A. P. C., *et al.*, Theoretical and experimental studies on two-phase thermosyphon shell and shell heat exchangers. **Applied Thermal Engineering**, vol. 171, no. January, 2020. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2020.115092.

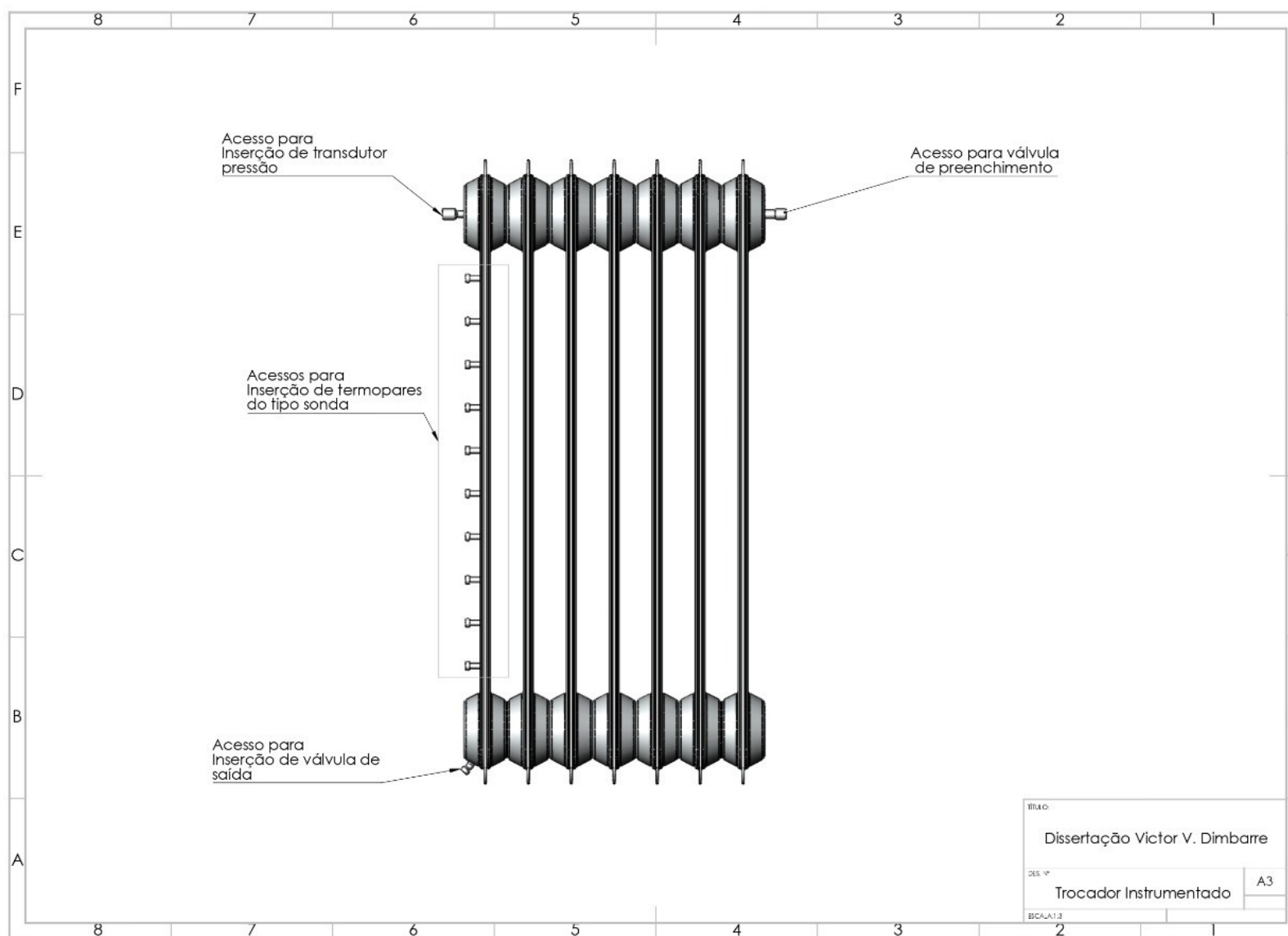
WACKERLY, D.; MENDENHALL, W.; SCHEAFFER, R. L. **Mathematical statistics with applications**. Cengage Learning, 2014.

WANG, L., *et al.*, Experimental study on the thermal performance of a novel two-phase loop thermosyphon under low-heat-flux conditions. **Applied Thermal Engineering**, 236, 121447, 2024.<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121447>

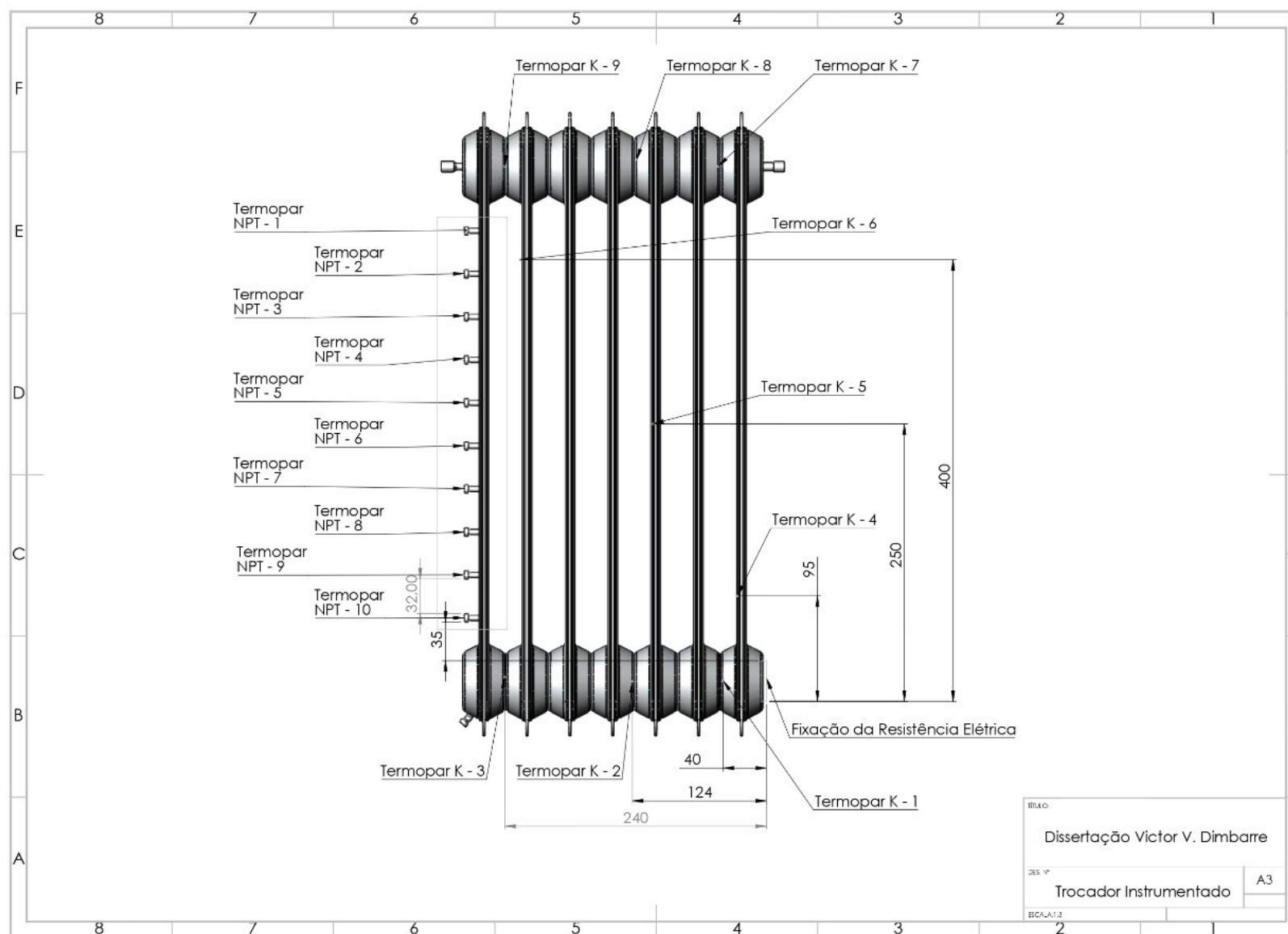
ZHENG, D., *et al.*, Investigation on thermal performance of electric heaters with nanofluids. **Fuel**, 320, 123966, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123966>

ZOHURI, B. **Heat pipe design and technology: Modern applications for practical thermal management**. Springer, 2016.

**APÊNDICE A - Projeto e Montagem do Protótipo do Aquecedor do Tipo Radiador
utilizando o Princípio de Funcionamento de Termossifões**

Apêndice A.1 - Detalhes dos acessos adicionados ao projeto inicial

Apêndice A.2 - Detalhes do posicionamento com as dimensões da posição.



APÊNDICE B - Ajuste de Curva/Calibração dos Termopares do Tipo K

Quadro B. 1 - Temperaturas do termômetro de referência e dos termopares fabricados coletados durante a calibração - Parte 1

Referência [°C]	TC_01	TC_02	TC_03	TC_04	TC_05	TC_06	TC_07	TC_08	TC_09	TC_10
9,5	9,48	9,43	9,41	9,43	9,46	9,45	9,48	9,49	9,46	9,45
20,5	20,40	20,49	20,46	20,52	20,47	20,43	20,50	20,48	20,40	20,53
54,5	54,40	54,38	54,38	54,48	54,37	54,32	54,36	54,31	54,54	54,43
68,5	68,84	68,73	68,81	68,86	68,79	68,77	68,75	68,68	68,64	68,79
96,5	96,42	96,78	96,88	96,85	96,46	96,41	96,45	96,41	96,67	96,38

Quadro B. 2 - Desvio padrão dos coletados durante a calibração - Parte 1

Desvio Padrão [°C]	TC_01	TC_02	TC_03	TC_04	TC_05	TC_06	TC_07	TC_08	TC_09	TC_10
9,5	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03
20,5	0,11	0,12	0,13	0,14	0,14	0,11	0,13	0,14	0,24	0,13
54,5	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,03	0,05	0,06	0,10	0,04
68,5	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,04	0,06	0,04
96,5	0,02	0,07	0,05	0,06	0,03	0,04	0,05	0,06	0,03	0,03

Quadro B. 3 - Termos referentes à equação - Parte 1

Coeficientes	TC_01	TC_02	TC_03	TC_04	TC_05	TC_06	TC_07	TC_08	TC_09	TC_10
Inclinação (A)	1,001	1,003	1,001	1,000	0,996	1,000	1,000	0,999	1,003	0,997
Interceptação (B)	-0,049	-0,083	-0,049	0,060	0,077	-0,017	0,044	0,000	-0,089	0,119
R^2	0,9999733	0,9999897	0,9999861	0,9999900	0,9999800	0,9999772	0,9999835	0,9999852	0,9999988	0,9999798

A equação de calibração dos termopares é composta pelos termos no seguinte arranjo: $y = Ax+B$

Quadro B. 4 - Temperaturas do termômetro de referência e dos termopares fabricados coletados durante a calibração - Parte 2

Referência [°C]	TC_11	TC_12	TC_13	TC_14	TC_15	TC_16	TC_17	TC_18	TC_19	TC_20
--------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

9,5	9,47	9,49	9,50	9,52	9,51	9,45	9,41	9,43	9,34	9,30
20,5	20,57	20,51	20,44	20,52	20,50	20,53	20,47	20,45	20,49	20,43
54,5	54,43	54,49	54,36	54,27	54,28	54,42	54,51	54,54	54,49	54,47
68,5	68,78	68,83	68,72	68,65	68,67	68,84	68,92	68,94	68,91	68,85
96,5	96,41	96,37	96,66	96,19	96,34	96,68	96,95	96,98	97,16	96,94

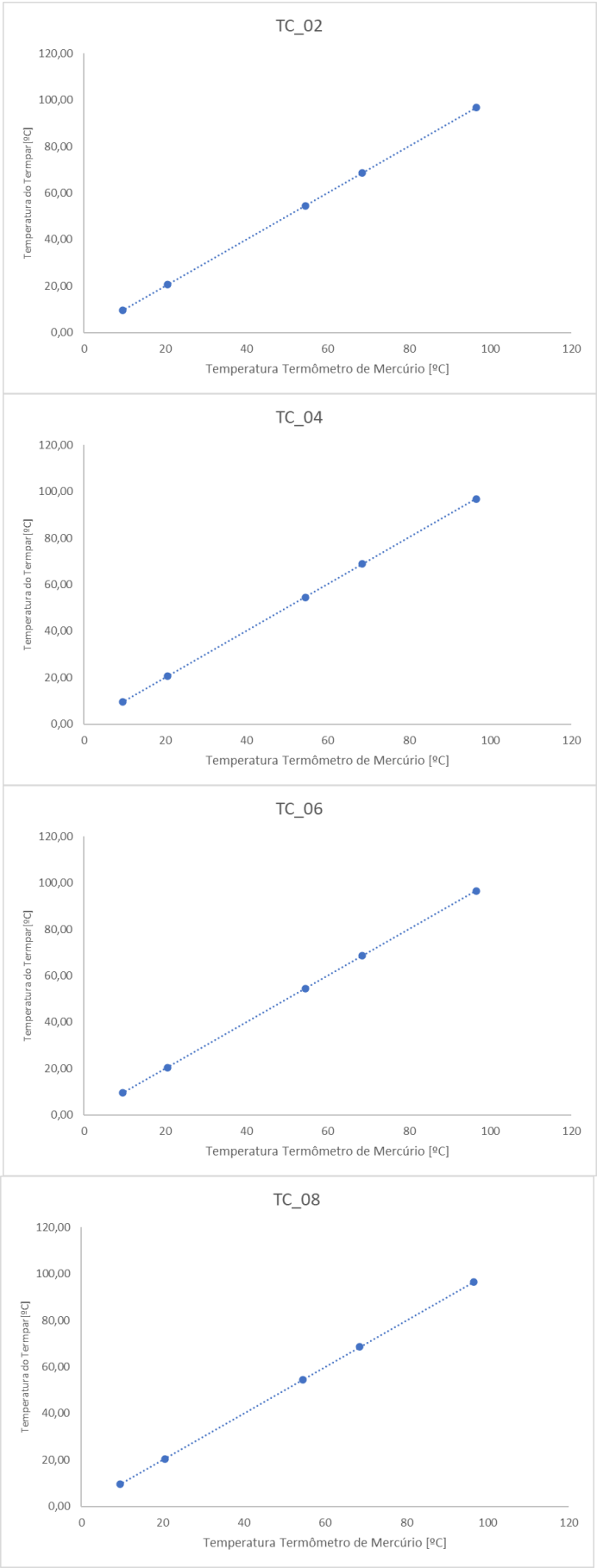
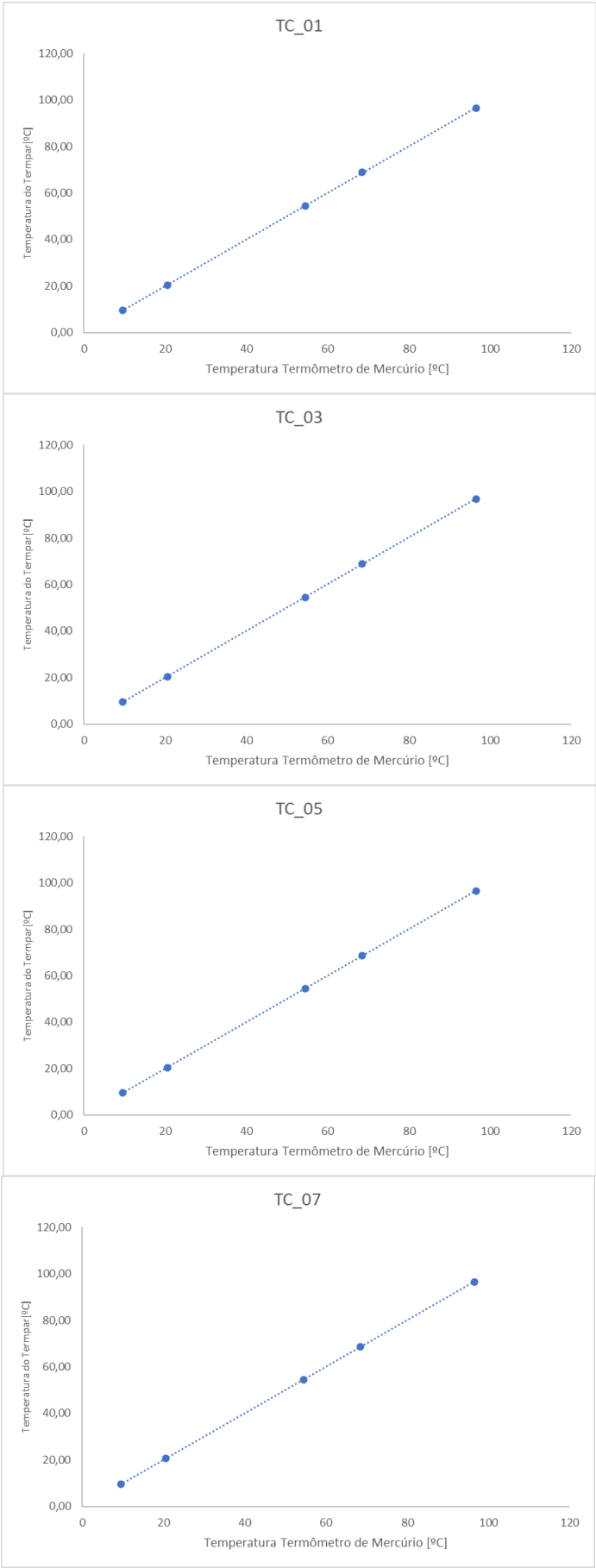
Quadro B. 5 - Desvio padrão dos coletados durante a calibração - Parte 2

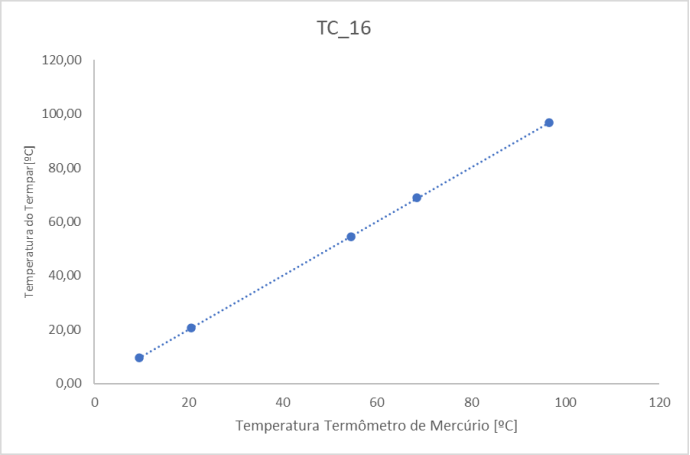
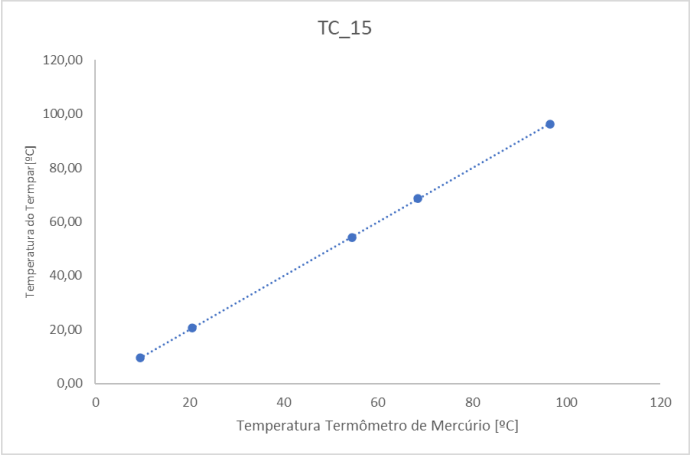
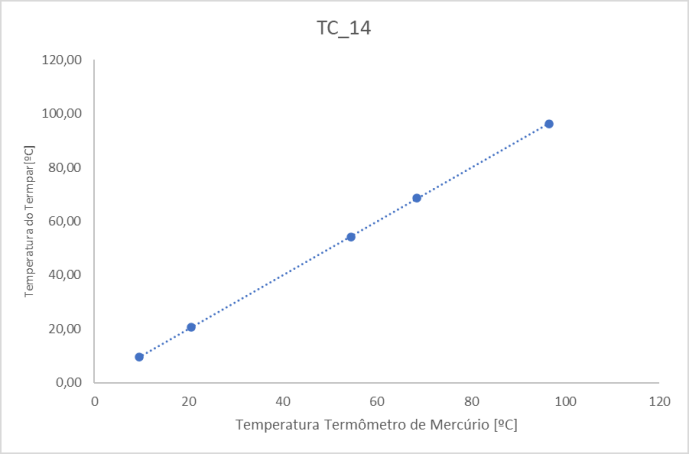
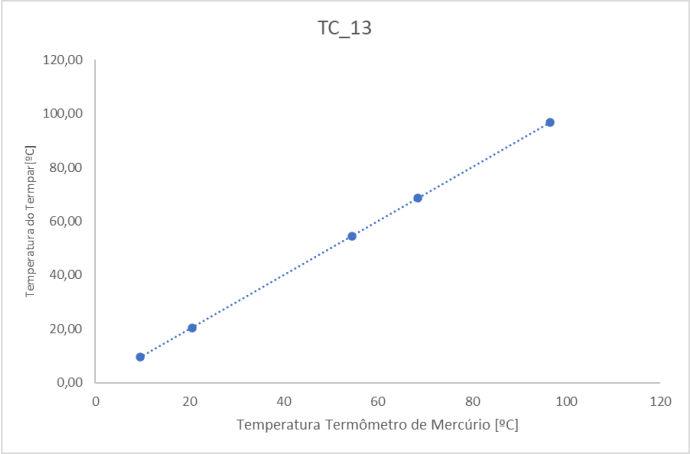
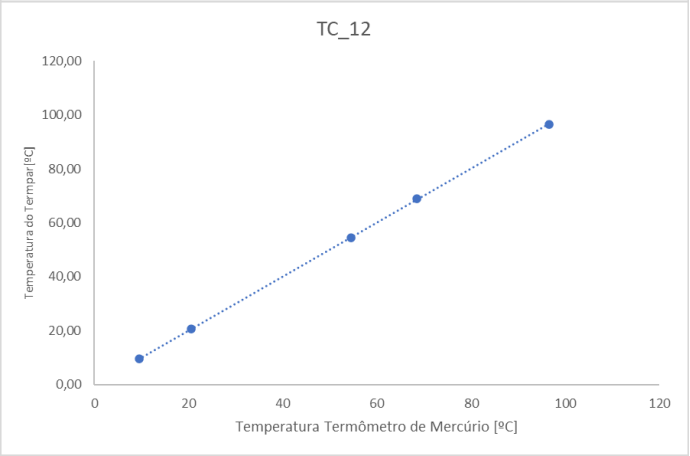
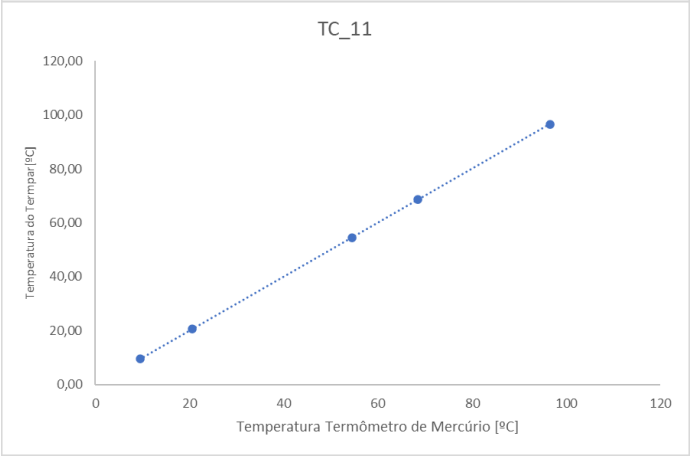
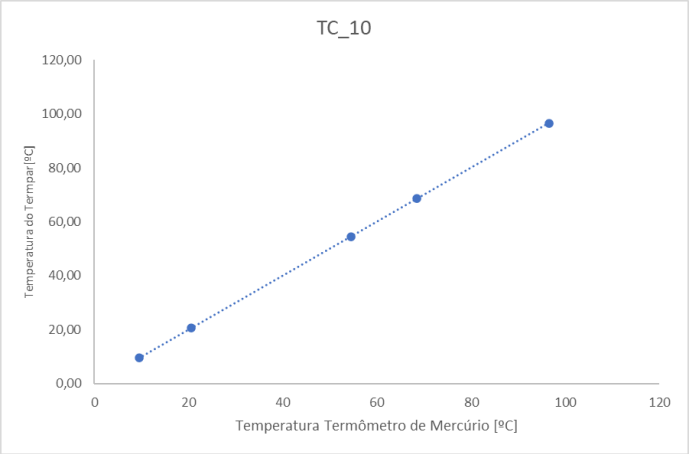
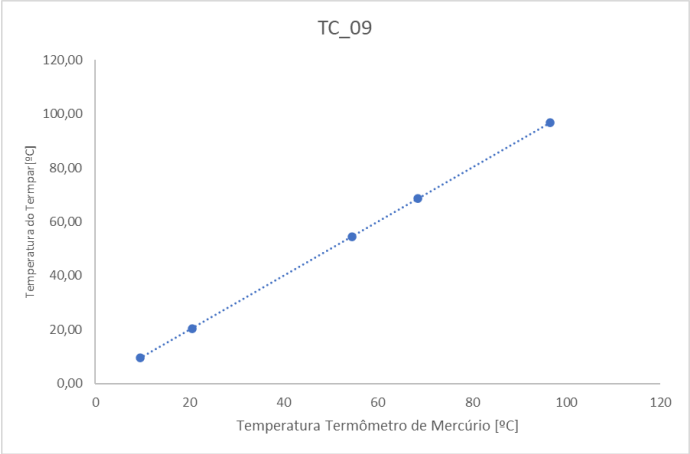
Desvio Padrão [°C]	TC_11	TC_12	TC_13	TC_14	TC_15	TC_16	TC_17	TC_18	TC_19	TC_20
9,5	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,03
20,5	0,14	0,10	0,13	0,13	0,10	0,11	0,13	0,13	0,12	0,10
54,5	0,04	0,02	0,11	0,08	0,09	0,05	0,06	0,07	0,06	0,05
68,5	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,03	0,05	0,06	0,06	0,06
96,5	0,02	0,05	0,04	0,04	0,02	0,06	0,04	0,04	0,07	0,02

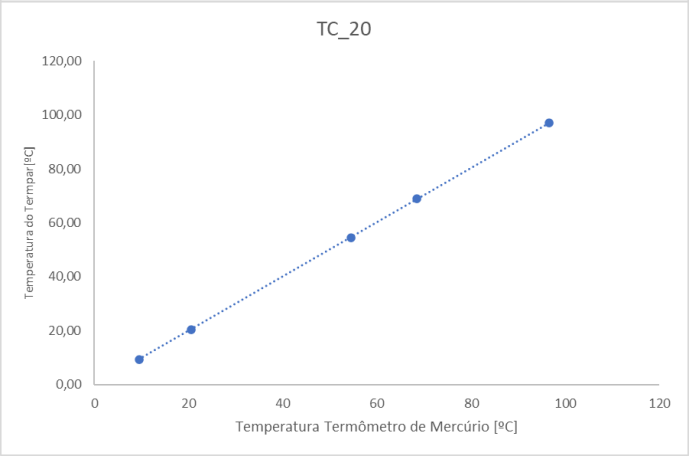
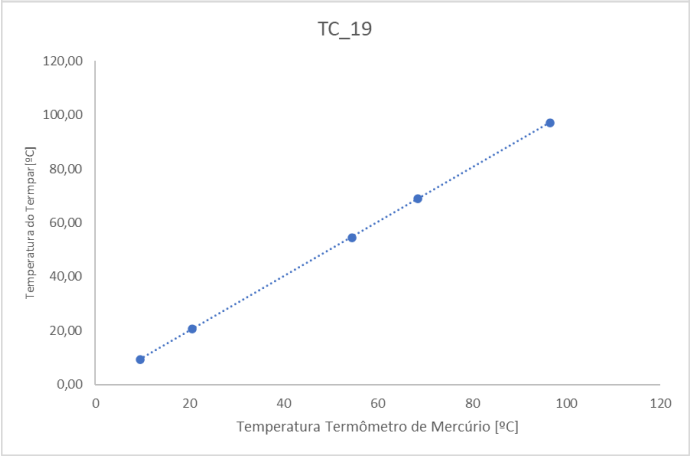
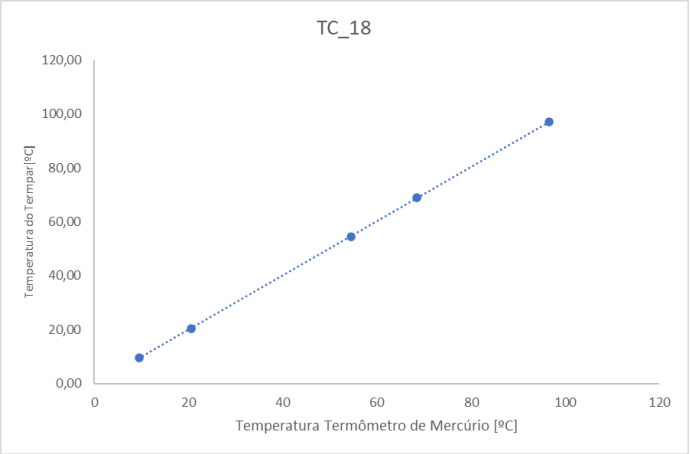
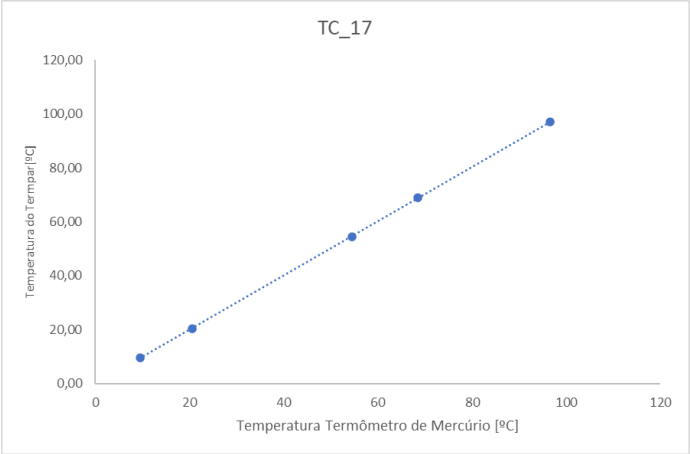
Quadro B. 6 - Termos referentes à equação - Parte 2

Coefficientes	TC_11	TC_12	TC_13	TC_14	TC_15	TC_16	TC_17	TC_18	TC_19	TC_20
Inclinação (A)	1,000	1,000	1,002	0,995	1,002	1,004	1,004	1,000	1,002	0,998
Interceptação (B)	0,022	0,005	-0,129	0,160	-0,050	-0,087	-0,105	-0,004	-0,091	-0,004
R^2	0,9999813	0,9999764	0,9999885	0,9999784	0,999982	0,9999854	0,9999897	0,9999905	0,9999869	0,9999918

A equação de calibração dos termopares é composta pelos termos no seguinte arranjo: $y = Ax + B$







APÊNDICE C - Desenvolvimento do Sistema de Aquisição de Potência

Linguagem de Programação

```

/*
    *Title: DDAS
    *Author: Victor VaurekDimbarre
    *Date: 14/11/2022
    *Version: v.13.5
    *Purpose: Acquire humidity, ambient temperature, and current data, and
    print on excel.
*/

#include <Wire.h>
#include <AHTxx.h>
#include <rExcel.h>
#include <ACS712.h>
#include <EmonLib.h>

rExcelmyExcel;
floatoutputTiming = 1000; // milliseconds
floatumidade;
floattemperatura;
doublevalor_Corrente = 0;
floattensao = 127;
floatpotencia = 0;
floatvetCorrente[300];
inti = 0;
intidx = 0;
intpinSCT = A0;

EnergyMonitor SCT013;
AHTxxaht10(AHTXX_ADDRESS_X38, AHT1x_SENSOR);

void setup()
{
    Serial.begin(115200);
    aht10.begin();
    pinMode(A3, INPUT); // ACS712
    SCT013.current(pinSCT, 6.0606);
    myExcel.clearInput();
}

void loop() {

    static unsigned long loopTime = 0;
    static unsigned long time1 = 0;

    //~~~~~ AHT10 ~~~~~ //

    umidade=aht10.readHumidity();
    temperatura=aht10.readTemperature();

    //~~~~~ SCT013 ~~~~~ //

    doubleIrms = SCT013.calcIrms(1480); // Calcula o valor da Corrente
    doublepot_Irms = Irms * tensao;

    //~~~~~ ACS712 ~~~~~ //
    doublemaior_Valor = 0;
    for(inti = 0; i< 300; i++)
    {

```

```

vetCorrente[i] = analogRead(A3);
delayMicroseconds(600);
}
for(inti = 0; i< 300; i++)
{
if(maior_Valor<vetCorrente[i])
{
maior_Valor = vetCorrente[i];
}
}
maior_Valor = maior_Valor * 0.004882812;
valor_Corrente = maior_Valor - 2.5;
valor_Corrente = valor_Corrente * 1000;
valor_Corrente = valor_Corrente / 66;           //sensibilidade : 66mV/A para
ACS712 30A / 185mV/A para ACS712 5A
valor_Corrente = valor_Corrente / 1.41421356;
doublepot_Acs = valor_Corrente * tensao;

//--- Print Excel via macro --- //
loopTime = millis();
if ((loopTime - time1) >= outputTiming) {
time1 = loopTime;
if (myExcel.up()) {
floatatemp = temperatura;
float hum = umidade;
floatpot = potencia;
//--- Calibração --- //
//$ 0 0 0
//$ 0,4 0,408461538 0,373846154
//$ 4,99 4,721 4,52
//$ 7,7 7,179333333 6,872666667
//$ 5,39 5,068 4,854
//$ 8,13 7,524 7,21
/// ~~~~~ ax+b ~~~~~
//ax// -0,036676319 -0,027360961
// b // 1,07747797 1,123524532
//rquad // 0,999842356 0,999852226
float a1=1.07747797;
float b1=-0.036676319;
float a2=1.123524532;
float b2=-0.027360961;
floatIrms_corrigido = a1*Irms+b1;
floatACS_corrigido = valor_Corrente*a2 -b1;
doublepot_med = ((Irms_corrigido+ACS_corrigido)/2)*tensao;
//---Layout Excell Print --- //
intstartLabel = 11;

myExcel.writeIndexed("Example", i + startLabel, 1,"%date%");
myExcel.writeIndexed("Example", i + startLabel, 2,"%time%");
myExcel.writeIndexed("Example", i + startLabel, 3, i, 2);
myExcel.writeIndexed("Example", i + startLabel, 4, temp,2);
myExcel.writeIndexed("Example", i + startLabel, 5, hum,2);
myExcel.writeIndexed("Example", i + startLabel, 6, Irms_corrigido,3);
myExcel.writeIndexed("Example", i + startLabel, 7, ACS_corrigido,3);
myExcel.writeIndexed("Example", i + startLabel, 8, pot_med,3);
i++;
}
}
delay(outputTiming );
}

```

**ANEXO A - Certificado de Calibração: Transdutor de Pressão
OmegaEngineering[®] PXM309**

