



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL, TESTES, MONTAGEM E PREPARAÇÃO DE TUBOS DE CALOR EM AMBIENTE DE LABORATÓRIO.

Renan Gomes Rosa

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientado pelo Dr.
Valeri Vlassov e Coorientador Dr. Rafael
Lopes Costa.

INPE
São José dos Campos
2023

FOLHA DE ROSTO

Relatório de Iniciação Científica do programa PIBIC, orientado pelo Dr. Valeri Vlassov, com coorientação do Dr. Rafael Lopes Costa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço o programa PIBIC/PIBITI do INPE e seus gerentes para abrir esta oportunidade de adquirir uma nova experiência e conhecimento específico na área em uma instituição de excelência como INPE.

RESUMO

Durante as atividades foram realizados estudos teóricos e experimentais sobre os tubos de calor, aprofundando o conhecimento sobre seu desempenho e limites operacionais. Com a introdução da teoria e testes de desempenho de tubos de calor, foi realizado o estudo do funcionamento do aparato de testes com mesa motorizada e sistema de aquisição de dados. Foi realizada uma cadeia de testes em um tubo de calor de alumínio carregado com amônia no Laboratório de Controle Térmico DIMEC/CGCE, localizado no Prédio Satélite. O objetivo foi realizar o estudo experimental do fenômeno dry-out, detectando em qual inclinação desfavorável o tubo de calor para de funcionar. O tubo de calor foi equipado com dois blocos, um deles contendo duas resistências elétricas para aquecer e um termistor entre elas. Outro bloco contém 4 termistores, sendo um deles para medir a temperatura ambiente. Na mesa giratória foi adicionado um sistema de refrigeração com ventiladores na extremidade oposta aos aquecedores instalados no tubo de calor experimental. Para coleta de dados, utilizou-se um sistema de aquisição de dados e fonte para fornecer tensão elétrica às resistências. Os testes foram padronizados para fins de análise posterior. Foi adotado um critério de parada, para a segurança, quando a região do evaporador de tubo de calor atingisse 45 graus Celsius, o teste seria interrompido. Com os dados coletados foram criados vários gráficos, e permitindo a comparação da eficiência do tubo de calor em situações de inclinação neutra, favorável e desfavorável. Também foram feitos testes com o resfriamento por convecção natural a fim de comparação. O resultado obtido de modo geral foi que na inclinação somente de 0.7 ± 0.2 graus desfavorável o tubo de calor já perde totalmente sua eficiência. O segundo projeto proposto foi o desenvolvimento de parte de uma calculadora térmica abrangendo as principais equações relacionadas aos tubos de calor com ranhuras axiais usados como estrutura capilar sob especificação fornecida. Optou-se pela construção da calculadora no ambiente MS Excel, oferecendo uma abordagem universal que permite realizar cálculos rápidos de parâmetros principais de tubos de calor e seus limites operacionais. Dando geometria externa e interna definida, condições ambientais e carga de calor, ferramenta permite, para fluidos de trabalho diferentes, calcular o limite capilar, limite de ebulição, de atrito e sônico, além de calcular a condutividade térmica efetiva, velocidades internas de vapor e líquido, e a temperatura do objeto de interesse acoplado com tubo de calor. Por fim, esta calculadora torna-se uma ferramenta muito útil tanto para engenheiros térmicos como para alunos como um instrumento de aprendizagem.

Palavras-chaves: Tubos de calor. Limites operacionais. Estudos experimentais. Testes de vida. Testes de desempenho.

Keywords: heat pipes, operating limits, experimental studies, life tests, performance tests.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1.1 - AIR COOLER GAMER Z3 - RM-ACZ-03-FB.....	3
Figura 2.1.2 – Ilustra o funcionamento do tubo de calor.	5
Figura 2.1.3 – Tubos de calor, presente no satélite CBERS.	7
Figura 2.1.4 – Ilustra o satélite CBERS no espaço.	7
Figura 2.1.5 – As linhas em azul escuro, ilustram o esquema de tubos de calores presentes no satélite CBERS.....	8
Figura 2.1.6 – Ilustra como é o perfil de um tubo de calor, com dois núcleos. ...	9
Figura 2.4.1 – Ilustra o setup configurado.	15
Figura 2.4.2 – Ilustra a configuração presente dentro do software.....	17
Figura 2.4.3 – Perfil de temperatura relativa do tubo de calor com inclinação neutra e com refrigeração por ventoinhas.	17
Figura 2.4.4 – Perfil de temperatura relativa em função do tempo, do tubo de calor com inclinação neutra e com resfriamento por convecção natural.	18
Figura 2.4.5 – Temperatura em função do tempo, com inclinação favorável e com resfriamento por convecção forçada.	19
Figura 2.4.6 – Perfil de temperatura ao longo do comprimento do tubo sob inclinação, com resfriamento por convecção forçada, sendo no X a distância em milímetros, e no eixo Y temperatura acima da temperatura ambiente.	20
Figura 2.4.7– Temperatura em função do tempo, com inclinação favorável e sem resfriamento por convecção forçada.	21
Figura 2.4.8 – Segundo teste, representando temperatura em função do tempo, no life- test-1, com inclinação favorável e sem resfriamento por convecção forçada.	22
Figura 2.4.9 – Ilustra o <i>Life-test-2</i> , após a reforma.....	23
Figura 2.4.10 – Ilustra o setup utilizado.....	25
Figura 2.4.11 – Representa como foram configurados os termistores.	26
Figura 2.4.12 – Representa o desempenho do tubo de calor em uma inclinação neutra, sem convecção forçada, no período de aquecimento.	27

Figura 2.4.13 – Representa o desempenho do tubo de calor em uma inclinação neutra, sem convecção forçada no período de resfriamento.....	28
Figura 2.4.14 – Representa o desempenho do tubo de calor em uma inclinação neutra, com convecção forçada, no período de aquecimento.	29
Figura 2.4.15 – Representa o desempenho do tubo de calor em uma inclinação neutra, com convecção forçada, no período de refrigeração.	29
Figura 2.4.16 – Teste realizado com inclinação de 0,2° desfavoráveis, na potência de 15 watts e sem convecção forçada.....	31
Figura 2.4.17 – Teste realizado com inclinação de 0,6° desfavoráveis, na potência de 15 watts e sem convecção forçada.....	31
Figura 2.4.18 – Teste realizado com inclinação de 0,7° desfavoráveis, na potência de 15 watts e sem convecção forçada.....	32
Figura 2.4.19 – Representação do fenômeno <i>dry out</i> parcial.....	32
Figura 2.4.20 – Teste realizado com inclinação de 0,8° desfavoráveis, na potência de 15 watts e sem convecção forçada.....	33
Figura 2.4.21 – Representação do <i>dry out</i> total.	33
Figura 2.4.22 – Teste realizado com inclinação de 0,2° desfavoráveis na potência de 20 watts e convecção forçada.	34
Figura 2.4.23 – Teste realizado com inclinação de 0,3° desfavoráveis na potência de 20 watts e convecção forçada.	34
Figura 2.4.24 – Teste realizado com inclinação de 0,4° desfavoráveis na potência de 20 watts e convecção forçada.	35
Figura 2.4.25 – Teste realizado com inclinação de 0,5° desfavoráveis na potência de 20 watts e convecção forçada.	36
Figura 2.4.26 – Teste realizado com inclinação de 0,6° desfavoráveis na potência de 20 watts e convecção forçada.	36
Figura 2.4.27 – Teste realizado com inclinação de 0,2° desfavoráveis na potência de 25 watts e convecção forçada.	37
Figura 2.4.28 – Teste realizado com inclinação de 0,4° desfavoráveis na potência de 25 watts e convecção forçada.	38
Figura 2.4.29 – Teste realizado com inclinação de 0,5° desfavoráveis na potência de 25 watts e convecção forçada.	38

Figura 2.4.30 – Teste realizado com inclinação de $0,6^\circ$ desfavoráveis na potência de 25 watts e convecção forçada.	39
Figura 2.4.31 – Teste realizado com inclinação de $0,2^\circ$ desfavoráveis na potência de 30 watts e convecção forçada.	40
Figura 2.4.32 – Teste realizado com inclinação de $0,3^\circ$ desfavoráveis na potência de 30 watts e convecção forçada.	40
Figura 2.4.33 – Teste realizado com inclinação de $0,4^\circ$ desfavoráveis na potência de 30 watts e convecção forçada.	41
Figura 2.4.34 – Teste realizado com inclinação de $0,5^\circ$ desfavoráveis na potência de 30 watts e convecção forçada.	42
Figura 2.4.35 – Representa a inclinação em função do tempo por minuto.	43
Figura 2.4.36 – O gráfico representa os dados obtidos através do ensaio.	44
Figura 2.4.37 – Representa a inclinação em função do tempo por minuto.	45
Figura 2.4.38 – O gráfico representa os dados obtidos através do ensaio, na potência de 30 watts e sem refrigeração forçada.	45
Figura 2.4.39 – Representa a inclinação em função do tempo por minuto.	46
Figura 2.4.40 – O gráfico representa os dados obtidos através do ensaio, na potência de 30 watts e com refrigeração forçada.	47
Figura 2.5.1 – Ilustra algumas equações utilizadas na calculadora.	50
Figura 2.5.2 – Ilustra a influência para o fluido amônia 40°C	51
Figura 2.5.3 – Ilustra a influência para o fluido Acetona 40°C	52
Figura 2.5.4 – Ilustra a influência para o fluido Água 40°C	52
Figura 2.5.5 – Ilustra a influência para o fluido Água 20°C	53
Figura 2.5.6 – Ilustra a influência para o fluido Acetona 20°C	54
Figura 2.5.7 – Ilustra a influência para o fluido Amônia 20°C	54

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.4.1 – Distribuição dos termopares ao longo do comprimento do tubo de calor.	15
Tabela 2.4.2 – Características físicas das ventoinhas utilizadas no experimento.	16
Tabela 2.4.3 – Representa as características físicas do tubo de calor carregado com amônia.....	24
Tabela 2.4.4 – Características físicas das ventoinhas utilizadas durante o experimento.....	25
Tabela 2.4.3 –Representa os polinômios encontrados após análise numérica.	48
Tabela 2.4.4 – Representa os valores da inclinação quando ocorreu o fenômeno <i>dry out</i>	49

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CGCE Coordenação-Geral da Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais

DIASD Divisão de Astrofísica

DICEP Divisão de Clima Espacial

DIHPA Divisão de Heliofísica, Ciências Planetárias e Aeronomia

DIMEC Divisão de Mecânica Espacial e Controle

DIEEC Divisão de Eletrônica Espacial e Computação

DISEP Divisão de Sistemas Espaciais

DIPST Divisão de Pequenos Satélites

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

SEGPR Serviço de Garantia do Produto

SID Serviço de Informação e Documentação

SPG Serviço de Pós-Graduação

TDI Teses e Dissertações Internas

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 DESENVOLVIMENTO	3
2.1 Revisão bibliográfica.....	3
2.1.1 Introdução a tubos de calores	3
2.1.2 Princípio de Funcionamento.....	4
2.1.3 Geração de Gases Não Condensáveis em Tubos de Calor.....	5
2.1.4 A Importância dos Tubos de Calor em Aplicações Espaciais	5
2.1.5 Pesquisas em tubos de calor	8
2.2 Cumprimento de objetivos e metodologia.....	11
2.2.1 Metodologia e resumo de cumprimento de objetivos	11
2.2.2 Estudos experimentais	12
2.2.3 Estudos teóricos.....	13
2.3 Equipamentos utilizados para pesquisa experimental	14
2.4 Análise de Resultados: Estudos Experimentais.....	15
2.4.1 Life-test-1	15
2.4.2 Life-Test-2	23
2.4.3 Estudo experimental do tubo de calor em diferentes ângulos de inclinação: avaliação do fenômeno de dry out.....	24
2.5 Desenvolvimento de uma calculadora térmica: análise dos limites operacionais do tubo de calor	50
2.5.1 Análises dos resultados teóricos	51
2.5.2 Resultados de análise de influência de inclinação para limite capilar .	51
2.5.3 Resultados de análise de influência de largura de ranhura para limite capilar	53
3 CONCLUSÃO	56

1 INTRODUÇÃO

Este relatório abordará de forma técnica os objetivos e a relevância deste estudo sobre tubos de calor. Será contextualizado o papel fundamental desses dispositivos em diversas áreas da indústria e suas aplicações no campo espacial. Exploraremos o projeto desses componentes, focado na transferência eficiente de calor, visando garantir um adequado resfriamento. A compreensão do comportamento dos tubos de calor em diferentes condições operacionais é essencial para otimizar seu desempenho e torná-los eficazes em aplicações práticas.

O objetivo principal deste estudo é realizar uma análise detalhada e caracterização dos tubos de calor, investigando como a inclinação e diferentes tipos de refrigeração afetam seu desempenho. Além disso, buscaremos desenvolver uma ferramenta computacional, uma calculadora térmica no Excel, capaz de determinar os limites operacionais desses dispositivos.

Para alcançar esses objetivos, realizamos uma revisão bibliográfica abrangente sobre os tubos de calor, também explorando suas funções, e sua importância na indústria e aplicações no espaço. Também estudamos as principais equações relacionadas a esses dispositivos. A partir desse embasamento teórico, conduzimos experimentos para analisar o comportamento dos tubos de calor em diferentes cenários, considerando inclinações neutras, favoráveis e desfavoráveis, com e sem convecção forçada. Esses experimentos nos proporcionaram dados valiosos para compreender o funcionamento dos tubos de calor em situações práticas.

Após realizar a revisão teórica e bibliográfica sobre tubos de calor, introduzimos normas e regulamentos de trabalho em laboratório. Com base nisso, um curso de boas práticas em laboratórios oferecido pelo próprio INPE, direcionado aos alunos de pós-graduação e mestrado. Essa etapa teve como objetivo assegurar um ambiente de trabalho seguro e adequado para a realização dos experimentos.

Com as bases teóricas e as práticas de laboratório estabelecidas, prosseguimos com os ensaios práticos. Iniciamos o estudo compreendendo e familiarizando-nos com o setup experimental utilizado. Os experimentos foram conduzidos na sala de Controles Térmicos 1, localizada no prédio Satélite do INPE.

O objetivo desses ensaios práticos era compreender e analisar sistematicamente os dados coletados dos testes realizados em um tubo de calor específico.

No contexto geral, esta pesquisa estará alinhada com os projetos de P&D "**Tubos de calor e experimento TUCA**" e "**Calculadora Térmica**", que estão em andamento no DIMEC/CGCE do INPE.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Introdução a tubos de calores

Os tubos de calor são dispositivos de transferência de calor passivos que têm sido amplamente utilizados em diversas aplicações industriais e espaciais. Eles são extremamente eficientes em situações em que é necessário dissipar grandes quantidades de calor de maneira eficaz e com tamanho reduzido, além de modo passivo, sem consumo de energia de elétrica (JUNIOR, 2015).

Os tubos de calor, também tem aplicações no cotidiano, principalmente termossifões, são tubos de calor, “vazios “, ou seja, sem estrutura capilar.

Figura 2.1.1 - AIR COOLER GAMER Z3 - RM-ACZ-03-FB



Fonte: MODE, RISE.

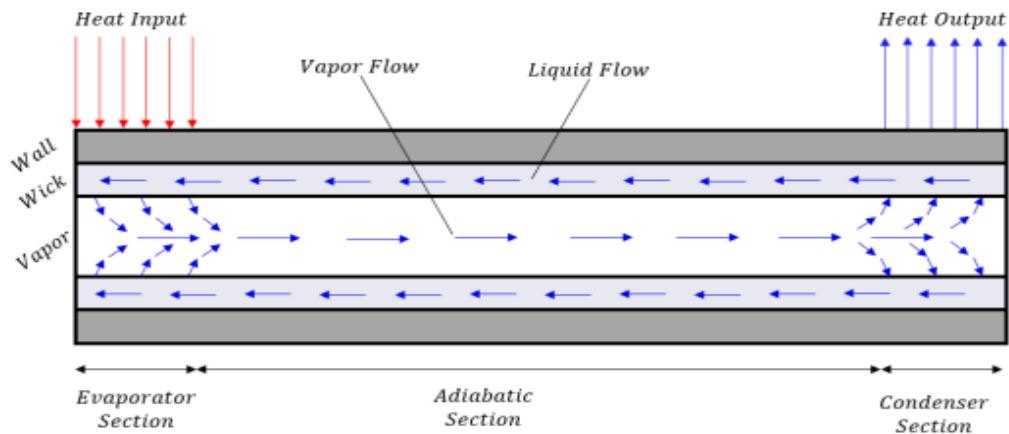
A transferência de calor em um tubo de calor ocorre através de três mecanismos principais: condução, convecção e evaporação/condensação. O tubo de calor é composto por uma estrutura selada, geralmente soldada, que contém um meio de trabalho, nesse meio está presente um fluido de trabalho em estado líquido-vapor, e é composto por três seções principais: evaporador, condensador e adiabático. O evaporador é a seção onde ocorre a evaporação do fluido de trabalho, absorvendo calor da fonte quente. O vapor gerado se desloca para a seção do condensador, onde ocorre a condensação do vapor, liberando o calor absorvido para o ambiente. O líquido condensado retorna ao evaporador por capilaridade ou ação gravitacional, completando o ciclo de transferência de calor (FAGHRI, 1994).

Os materiais presentes no corpo cilíndrico do tubo podem ser variados, nas indústrias de eletrônicos, os mais comuns são de cobres, já na área espacial, o mais utilizado é o alumínio. Diferentes tipos de matérias exigem fluidos de trabalhos diferentes, os principais fluidos mais utilizados são: água, acetona e amônia. Os fluidos também definem a faixa de temperatura operacional de tubos de calor. Estudos encontrados na literatura, mostram que diferentes tipos de materiais e fluidos, apresentam uma vida útil, no estudo (REAY e JOHNSON, 1976), descrevem estudos com o fluido de trabalho acetona.

2.1.2 Princípio de Funcionamento

Os tubos de calor são dispositivos baseados no princípio da transferência de calor por mudanças de fase do fluido de trabalho contido em seu interior. Eles consistem em três componentes principais: o evaporador, a linha adiabática e o condensador. O fluido de trabalho recebe calor do evaporador, transformando-se em vapor, e se move para a região adiabática, onde o calor latente é transferido ao longo do tubo. Por fim, o vapor se condensa no condensador, liberando o calor latente para o ambiente externo. O fluido condensado retorna ao evaporador através de capilaridade ou força gravitacional para reiniciar o ciclo (FAGHRI, 1994).

Figura 2.1.2 – Ilustra o funcionamento do tubo de calor.



Fonte: (ENKE,2020).

2.1.3 Geração de Gases Não Condensáveis em Tubos de Calor

Os tubos de calor podem enfrentar o problema conhecido como "gases não condensáveis", (GNC), que afeta seu desempenho. Os GNC podem ser gerados por reações químicas muito lentas, com tempo, por razão da presença de impurezas em pequenas concentrações que podem existir no interior do tubo de calor e no fluido de trabalho. Os GNC bloqueiam parte do tubo de calor durante o funcionamento. Isso pode ocorrer também devido a vazamentos, materiais inadequados ou processos de fabricação ou reações químicas entre o fluido com o material do corpo tubo de calor. A presença desses gases não condensáveis no interior do tubo de calor pode resultar em diversos problemas, como: Redução da Eficiência, Bloqueio de Fluxo e Instabilidade do Ciclo. (MARCUS,1973).

2.1.4 A Importância dos Tubos de Calor em Aplicações Espaciais

Os tubos de calor, devido à sua alta eficiência na dispersão de calor, operação passiva e baixo peso, têm uma ampla aplicação no contexto espacial. Além disso, eles são dispositivos simples e confiáveis, tornando-os uma escolha preferencial para várias aplicações no espaço. (BRENNAN e KROLICZEK, 1979).

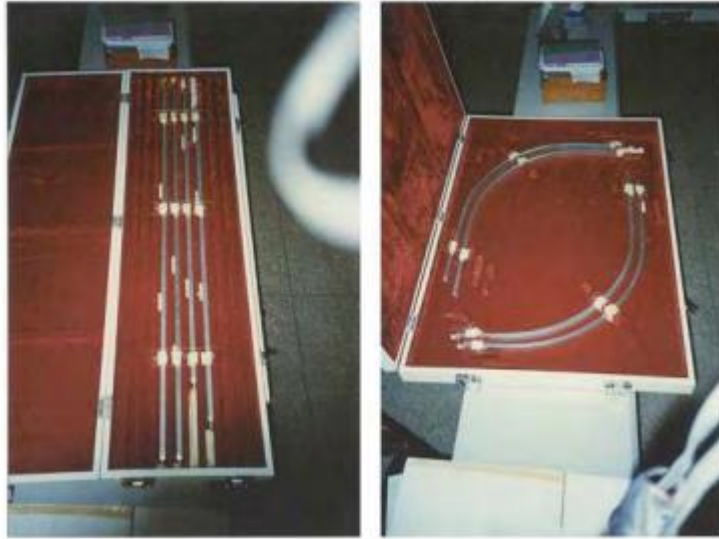
Os tubos de calor empregados em aplicações espaciais podem ser categorizados em dois grupos, de acordo com as exigências do projeto térmico do satélite em questão:

1. Transporte de calor: Esses tubos são utilizados para transferir o calor dissipado pelos componentes eletrônicos de um ponto específico para outro ponto designado, onde ocorre remoção
2. Dispersão de calor: Esses tubos são responsáveis por espalhar o calor gerado pelos componentes eletrônicos para área de estrutura acoplada.

De maneira geral, os satélites tendem a gerar uma quantidade de calor pelos componentes eletrônicos, por isso existe a necessidade de dispersão de calor, já que no espaço não há troca de calor por convecção natural ou forçada. Os tubos de calor permitem a troca de calor de modo passivo, sem consumo de energia, além de não aumentar muito o peso do sistema. Eles ficam fixados em painéis estruturais (GILMORE, 1994). Abaixo estão mencionadas quantidades de tubos de calor utilizados em cada um dos satélites projetados e construídos no âmbito do programa CBERS do Brasil:

1. CBERS 1 & 2: Quatro tubos de calor inseridos em dois painéis.
2. CBERS 2B: Quatro tubos de calor inseridos em dois painéis e mais quatro na câmara de captura de imagens.
3. CBERS 3 & 4: Vinte e dois tubos de calor, todos destinados à estabilização térmica de seis painéis.

Figura 2.1.3 – Tubos de calor, presente no satélite CBERS.



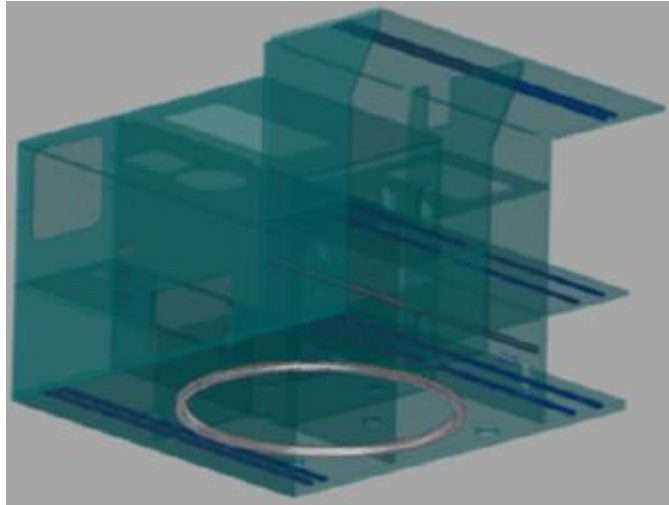
Fonte: (SANTOS,2009)

Figura 2.1.4 – Ilustra o satélite CBERS no espaço.



Fonte: (Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE)) projeto CBERS.

Figura 2.1.5 – As linhas em azul escuro, ilustram o esquema de tubos de calores presentes no satélite CBERS.



Fonte: (Projeto CBERS/INPE)

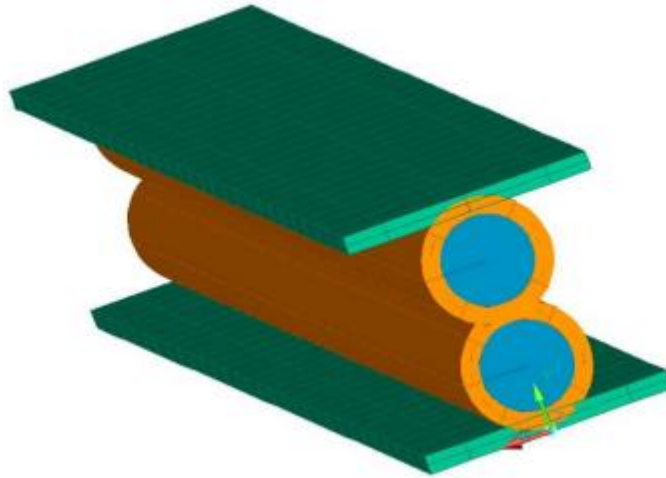
2.1.5 Pesquisas em tubos de calor

Após analisar a literatura disponível, constatamos a recorrência da técnica de redundância no sistema de refrigeração de satélites. Um padrão notável é a presença de dois núcleos nos perfis dos tubos de calor. Esta abordagem foi também refletida nos testes realizados em laboratórios, onde a configuração de tubos de calor com dois núcleos foi adotada para avaliar a ocorrência de dry out.

De maneira congruente, no artigo (Vlassov et al, 2021) amplia-se essa discussão ao abordar o emprego de tubos de calor com duplos núcleos. A pesquisa em questão, realizada pelos autores, ressalta a relevância dessa estratégia no contexto do controle térmico de satélites. Além disso este artigo apresenta uma investigação detalhada sobre a aplicação de tubos de calor ranhurados em satélites para fins de controle térmico. Descrevendo os testes realizados em diferentes etapas do desenvolvimento, fabricação e teste do satélite CBERS 04A.

A Figura 2.1.6, ilustra como é perfil de tubo de calor com dois núcleos.

Figura 2.1.6 – Ilustra como é o perfil de um tubo de calor, com dois núcleos.



Fonte: Vlassov et al., 2021, p. 4.

Santos et al. (2018) conduziram testes transientes de inicialização em tubos de calor, variando as inclinações favoráveis e desfavoráveis. O estudo empregou um tubo de calor de alumínio de 2 canais com ranhuras retangulares, usando amônia como fluido de trabalho.

Fleischman et al. (1991) também examinaram testes de inclinação em um tubo de calor criogênico, com oxigênio como fluido de trabalho. Eles analisaram a distribuição de fase líquida nas ranhuras retangulares sob diferentes inclinações de gravidade, e avaliaram os limites capilares em inclinações variadas.

Estudos experimentais focados em testes de inclinação favorável foram realizados para aplicação em satélites durante verificações (Yasuko Shibano e Hiroyuki Ogawa, 2015). Esses estudos identificaram e descreveram efeitos como atrasos na inicialização e oscilações de temperatura em determinados regimes.

Vlassov et al. (2018) conduziram um estudo comparativo de desempenho entre tubos de calor com diferentes tipos de ranhuras, incluindo formatos retangulares e em formato de ômega.

Métodos experimentais visando a detecção de momentos críticos, como o dry-out, também foram realizados. Bertoldo et al. (2015) propuseram um novo método para traçar a curva do limite capilar em relação a inclinações desfavoráveis. Esse método utilizou um procedimento transitório para detectar o dry-out, empregando um dispositivo com mesa motorizada de velocidade angular controlada e monitorada.

Recentemente, Enke et al. (2021) desenvolveram um método transitório para detectar a presença de gás não condensável (GNC). Os testes foram conduzidos em tubos de calor de alumínio carregados com amônia. Este método tem potencial para ser empregado em testes de vida útil e verificações de tubos de calor.

Além disso, várias outras pesquisas relacionadas aos tubos de calor estão em andamento, promovendo avanços contínuos nessa área crucial para aplicações espaciais e de controle térmico.

2.2 Cumprimento de objetivos e metodologia

2.2.1 Metodologia e resumo de cumprimento de objetivos

A metodologia usada para estudos experimentais é alinhada com abordagem comum em pesquisas experimentais de tubos de calor. O estudo de desempenho dos tubos de calor se faz pelo monitoramento de perfil da temperatura ao longo do comprimento de tubo de calor, quando uma extremidade será aquecida e a outra resfriada. A análise detalhada destes perfis permite fazer conclusões de funcionamento ou não, calcular condutividade efetiva e quantificar outros parâmetros. Uma vez que a inclinação afeta forças capilares em gravidade, é importante realizar testes de desempenho em várias inclinações a partir da posição horizontal. Estas análises devem ser acompanhadas com modelos matemáticos, simplificados ou detalhados, de tubos de calor, desenvolvidos seja em ambiente Excel, seja em uma linguagem de programação, ou usando software comercial.

O objetivo principal deste estudo é realizar uma análise detalhada e caracterização dos tubos de calor, investigando como a inclinação e os diferentes tipos de refrigeração afetam seu desempenho. Além disso, buscamos desenvolver uma ferramenta computacional, uma calculadora térmica no Excel, que seja capaz de determinar os limites operacionais desses dispositivos.

O objetivo dos ensaios em laboratório foi familiarizar-nos com o setup experimental e os equipamentos utilizados, visando investigar o desempenho de um tubo de calor em diferentes inclinações e potências. Para isso, foram conduzidos ensaios estáticos e dinâmicos, com o intuito de analisar os efeitos da refrigeração forçada em comparação com a convecção natural.

No entanto, nos estudos teóricos, decidimos aprimorar os objetivos práticos, adotando uma metodologia mais aprofundada. Para isso, realizamos uma extensa revisão da literatura e desenvolvemos uma calculadora térmica, capaz de analisar o desempenho do tubo de calor e calcular seus limites operacionais em diferentes condições de funcionamento.

Dessa forma, os estudos teóricos complementam os experimentos práticos, oferecendo uma abordagem mais abrangente para a compreensão do comportamento do tubo de calor. A combinação de resultados experimentais e análises teóricas nos permitiu obter uma visão mais completa do desempenho do tubo de calor e identificar suas capacidades em diferentes cenários operacionais.

Na condução deste estudo, adotamos uma metodologia aprimorada para o controle e análise dos testes realizados. Essa abordagem envolveu a criação de uma planilha de trabalho dedicada para rastrear os testes já realizados, bem como o desenvolvimento de uma nomenclatura adequada para a organização e o armazenamento dos dados, evitando problemas futuros.

Para facilitar a análise dos dados, os registros foram salvos em formato (.csv) e importados para o Excel. Essa ferramenta permitiu a manipulação e visualização eficiente dos dados coletados, além de fornecer recursos poderosos para a criação de gráficos significativos.

Na plotagem dos gráficos, utilizamos uma metodologia que envolveu o cálculo do delta de temperatura. Essa abordagem consistiu em subtrair a temperatura ambiente registrada no momento da coleta da temperatura medida naquele mesmo instante. Tal técnica foi necessária devido à observação de flutuações significativas na temperatura ambiente ao longo do tempo durante a análise dos dados coletados.

2.2.2 Estudos experimentais

Os objetivos desses ensaios práticos consistem em compreender e analisar de forma sistemática os dados coletados a partir dos testes realizados em um tubo de calor específico. Através da condução dos experimentos, foi possível desenvolver habilidades práticas em laboratório e aprimorar as técnicas de análise.

Para realizar as análises, utilizamos softwares como o Excel, que nos auxiliaram no tratamento dos dados e na criação de gráficos para uma compreensão mais abrangente dos resultados obtidos nos ensaios. Essa

abordagem permitiu uma análise mais precisa e detalhada dos dados experimentais.

No “*life-test-1*” os testes foram conduzidos em diferentes condições de inclinação: neutra e favorável. O intuito era compreender a eficiência do tubo de calor em diferentes cenários e, posteriormente, analisar a presença de gás não condensável (GNC) dentro do tubo. Para essa análise de GNC, utilizamos informações de relatórios de alunos anteriores, referenciados na bibliografia.

O estudo experimental do tubo de calor para avaliação do fenômeno de *dry out*, o procedimento experimental foi conduzido para investigar o desempenho de um tubo de calor em diferentes inclinações e potências. O experimento consistiu em realizar testes estáticos e dinâmicos, além de analisar os efeitos da refrigeração forçada em comparação com a convecção natural

2.2.3 Estudos teóricos

O objetivo do estudo teórico foi proporcionar uma introdução abrangente aos tubos de calor, incluindo suas aplicações, características principais e limites operacionais. Além disso, reconhecendo a importância de uma análise precisa dos limites operacionais do tubo de calor, desenvolvemos uma calculadora térmica personalizada. Essa ferramenta permitiu uma avaliação mais dinâmica e precisa do desempenho do sistema, facilitando a identificação de suas capacidades em diferentes cenários operacionais. Combinando o conhecimento teórico adquirido e a utilização da calculadora térmica, fomos capazes de obter uma compreensão mais abrangente e prática dos tubos de calor, incluindo suas capacidades e limitações, o que contribuiu para o aprimoramento do estudo como um todo.

Ao explorar o estudo teórico, também foi revisado a aplicações do tubo de calor no cotidiano, e no âmbito espacial.

2.3 Equipamentos utilizados para pesquisa experimental

Este tópico especifica todos os equipamentos utilizados em laboratório para o desenvolvimento dos ensaios práticos.

Foram utilizados:

- 1- Tubo de calor carregado com acetona, presente no life-tes-1.
- 2- Tubo de calor carregado com amônia para o estudo do fenômeno *dry out*.
- 3- Aquisição de dados, modelo: “(Agilent 34970^a)”.
- 4- Resistência “(Polyimide flexible heater ou skin heater)”.
- 5- Termopares tipo T, modelo (AWG30).
- 6- Termistores do tipo NTC de 10 k Ω .
- 7- Fonte regulável.
- 8- Mesa giratória.
- 9- Inclinômetro.
- 10- Ventoinhas.
- 11- Software “(Agilent Benchlink Data Logger)”.

Para a realização do teste experimental do tubo de calor em diferentes ângulos de inclinação: avaliação do fenômeno de *dry out* do tubo de calor, foi utilizado um bloco que foi fabricado em celeron, um material polimérico com baixa condutividade térmica. Esse bloco está equipado com dois aquecedores *MINCO HK5160R44* conectados em paralelo, formando uma resistência equivalente de 22,22 Ω , além de um sensor de temperatura do tipo termistor NTC de 10 k Ω . E outro bloco, fabricado do mesmo material, porém contando 4 termistores.

2.4 Análise de Resultados: Estudos Experimentais

2.4.1 Life-test-1

A Figura 2.4.1 representa o setup utilizado. E na Tabela 2.4.1, representa as distâncias de cada termopar, considerando a extremidade com o aquecedor como origem, na Tabela 2.4.2, representa as características físicas das ventoinhas utilizadas para os testes com convecção forçada.

Figura 2.4.1 – Ilustra o setup configurado.



Fonte: Fotografia realizada pelo Autor.

Tabela 2.4.1 – Distribuição dos termopares ao longo do comprimento do tubo de calor.

Termopar	Distância em (mm)
TC01	50.00
TC02	110.00
TC03	210.00
TC04	260.00
TC05	310.00

TC06	340.00
TC08	350.00
TC09	360.00
TC10	370.00
TC11	380.00

Fonte: Autor.

Tabela 2.4.2 – Características físicas das ventoinhas utilizadas no experimento.

Dimensão	90x90x25 mm
Corrente	0.20A
Tensão	12 VDC
Rotação	2900 RPM

Fonte: Manual do fabricante.

O teste foi dividido em duas etapas de aquecimento do tubo de calor. Na primeira fase, fornecemos aproximadamente 5,6 volts para a resistência e mantivemos essa alimentação por 10 minutos. Na segunda fase de aquecimento, aumentamos a tensão fornecida para a resistência para 7,3 volts, novamente deixamos 10 minutos após aumento de tensão. A Figura 2.4.2, representa a configuração do software utilizado “*Agilent Benchlink Data Logger*”, esta configuração está salva para uso dentro do programa, nome do arquivo é: LifeTest1.4.

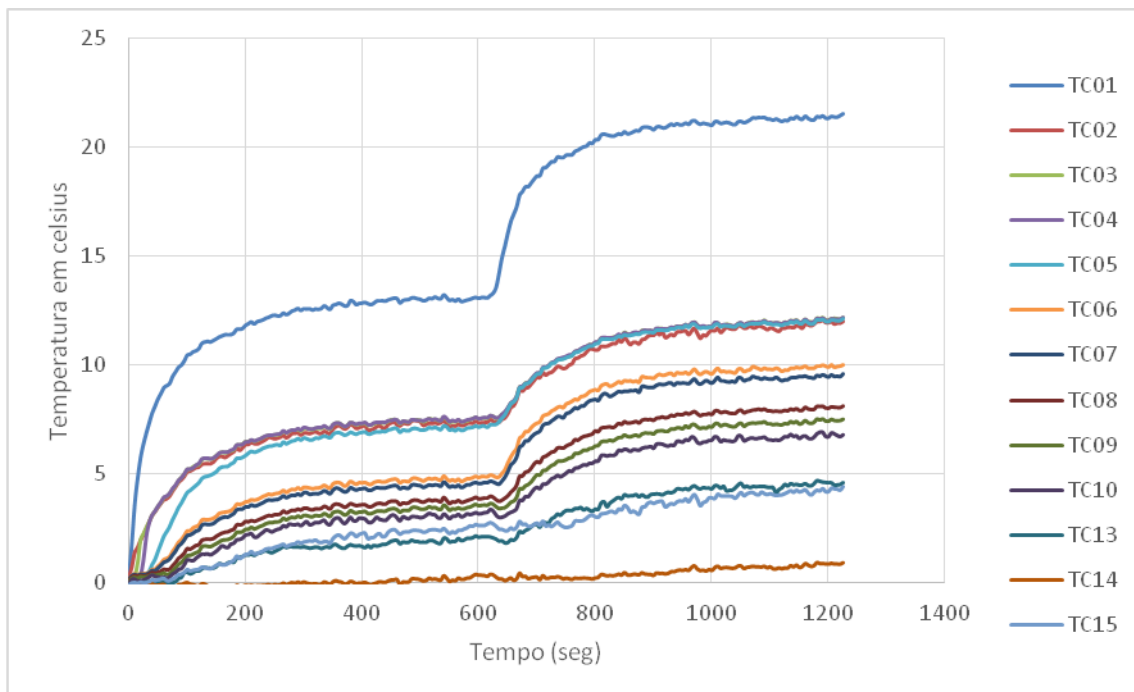
Figura 2.4.2 – Ilustra a configuração presente dentro do software.

Channel		Measurement					
ID	Scale	Name	Function	Range	Resoluti	Advance	Scal
101	<input checked="" type="checkbox"/>	TC01	Temp (type T)				<input type="checkbox"/>
102	<input checked="" type="checkbox"/>	TC02	Temp (type T)				<input type="checkbox"/>
103	<input checked="" type="checkbox"/>	TC03	Temp (type T)				<input type="checkbox"/>
104	<input checked="" type="checkbox"/>	TC04	Temp (type T)				<input type="checkbox"/>
105	<input checked="" type="checkbox"/>	TC05	Temp (type T)				<input type="checkbox"/>
106	<input checked="" type="checkbox"/>	TC06	Temp (type T)				<input type="checkbox"/>
107	<input type="checkbox"/>		DC volts	Auto	5.5 digits		<input type="checkbox"/>
108	<input checked="" type="checkbox"/>	TC07	Temp (type T)				<input type="checkbox"/>
109	<input checked="" type="checkbox"/>	TC08	Temp (type T)				<input type="checkbox"/>
110	<input checked="" type="checkbox"/>	TC09	Temp (type T)				<input type="checkbox"/>
111	<input checked="" type="checkbox"/>	TC10	Temp (type T)				<input type="checkbox"/>
112	<input checked="" type="checkbox"/>	VDC	DC volts	Auto	5.5 digits		<input type="checkbox"/>
113	<input checked="" type="checkbox"/>	AMB	Temp (type T)				<input type="checkbox"/>

Fonte: Produção do Autor.

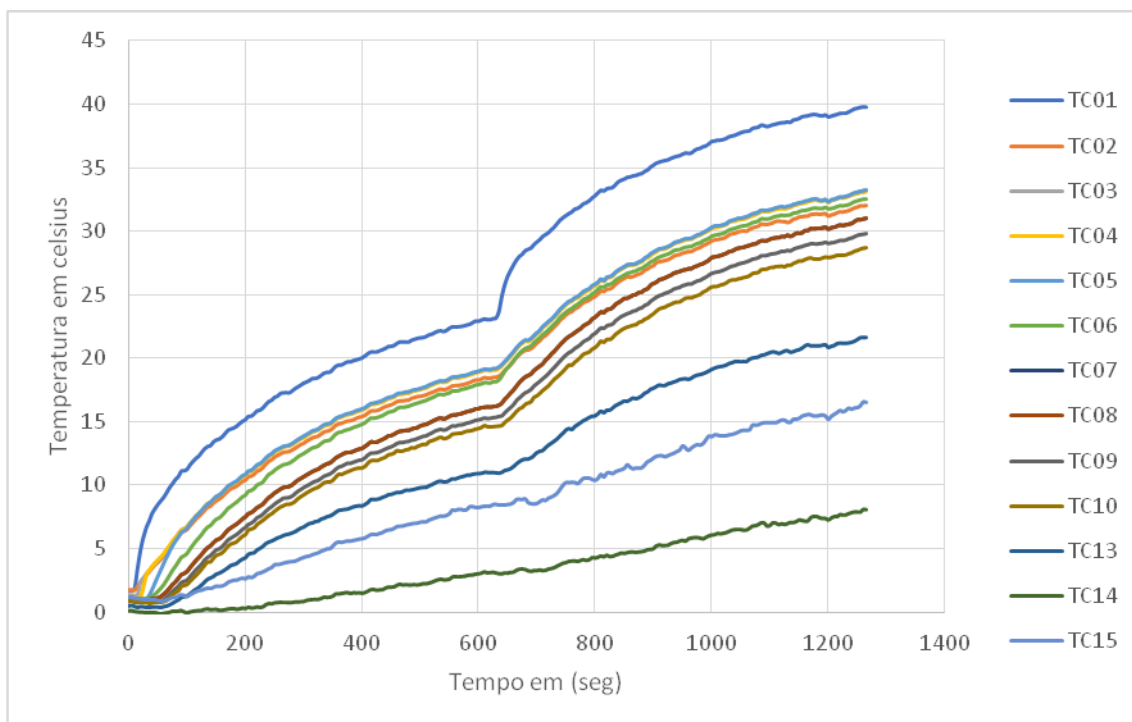
Com a realização dos ensaios foram obtidos tais resultados.

Figura 2.4.3 – Perfil de temperatura relativa do tubo de calor com inclinação neutra e com refrigeração por ventoinhas.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 2.4.4 – Perfil de temperatura relativa em função do tempo, do tubo de calor com inclinação neutra e com resfriamento por convecção natural.

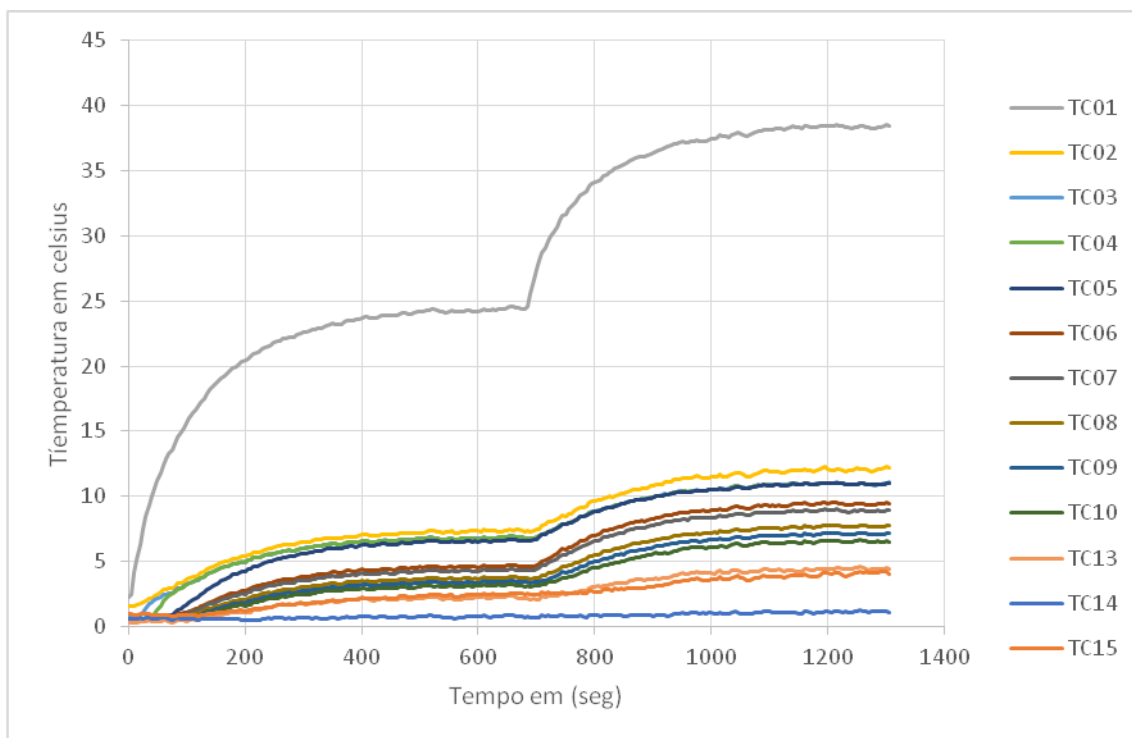


Fonte: Produção do Autor.

Como pode-se observar nas duas Figuras 2.4.3 e 2.4.4, existe um aumento de temperatura aproximadamente a 600 segundos, esse aumento é devido ao aumento da tensão. Analisando-as novamente, é perceptível como a convecção forçada contribui muito para melhorar a eficiência do tubo, pois a temperatura termopar que está entre a resistência, é aproximadamente 18 graus mais frio, confirmando a importância lida na revisão bibliográfica.

No segundo experimento, realizamos um teste com uma inclinação favorável para avaliar o comportamento do tubo de calor. Optamos por realizar o teste em uma inclinação alta, utilizando apoios para alcançar uma inclinação segura de 27 graus favoráveis. O teste foi conduzido seguindo a mesma metodologia descrita anteriormente. Os dados obtidos foram representados no gráfico ilustrado pela Figura 2.1.5.

Figura 2.4.5 – Temperatura em função do tempo, com inclinação favorável e com resfriamento por convecção forçada.

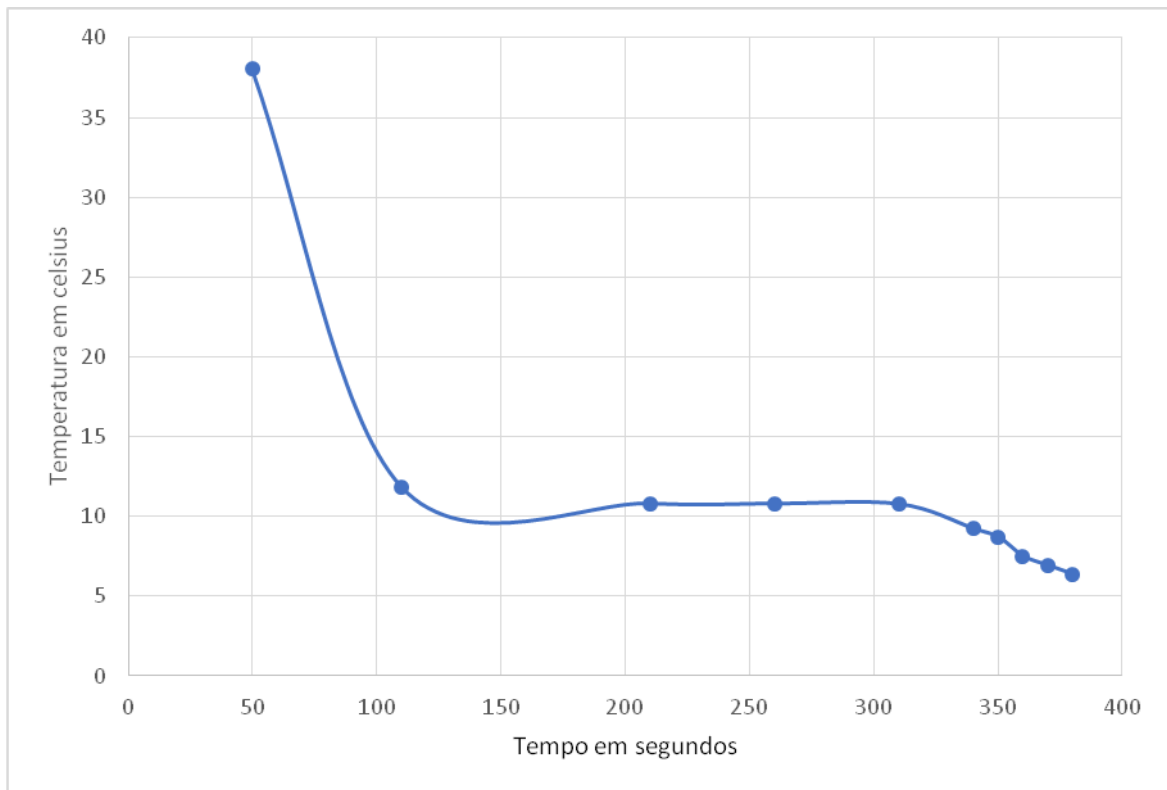


Fonte: Produção do Autor.

Conforme a Figura 2.4.5 demonstra, pode-se observar que a uma diferença de temperatura muito grande ocorreu no início do evaporador, comparado com resultados com teste de inclinação neutra. Isso ocorre devido a inclinação favorável do tubo de calor, faz que o líquido bloqueia parcialmente o evaporador, elevando a temperatura

Com os dados coletados, foi feita a análise; com isso obteve-se o gráfico em Figura 2.4.6, onde o eixo “X” representa distância do termopar dá origem e o eixo “Y” representa a temperatura relativa no fim de transiente.

Figura 2.4.6 – Perfil de temperatura ao longo do comprimento do tubo sob inclinação, com resfriamento por convecção forçada, sendo no X a distância em milímetros, e no eixo Y temperatura acima da temperatura ambiente.

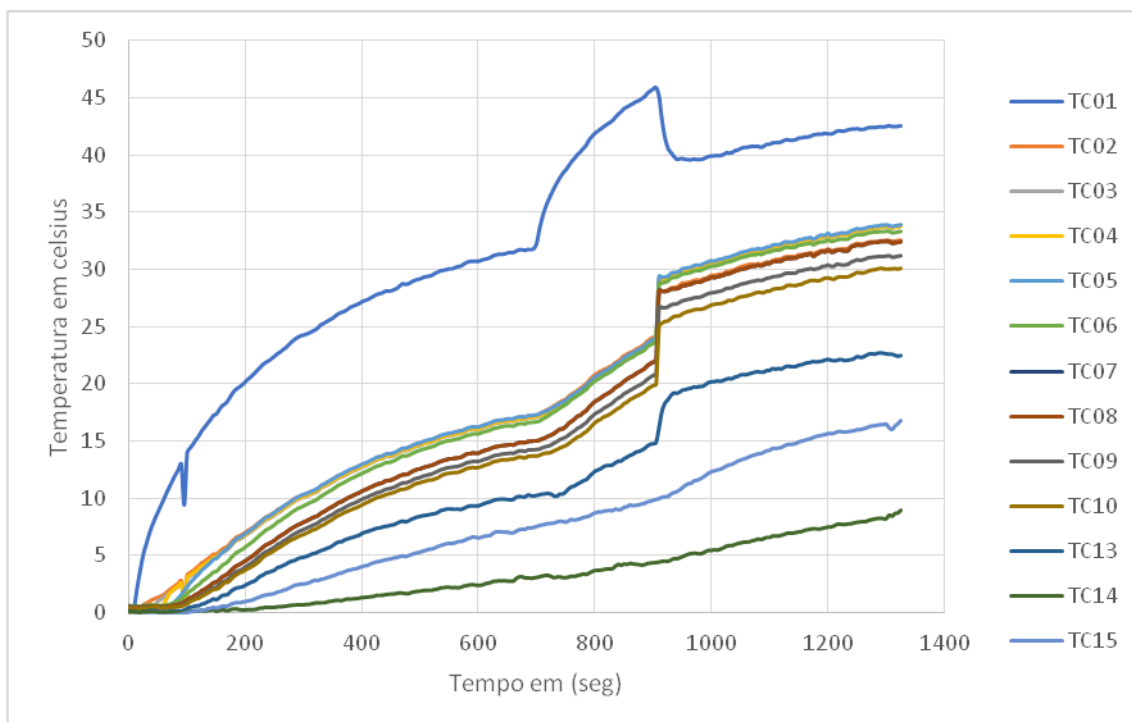


Fonte: Produção do Autor.

Conforme a Figura 2.4.6 demonstra, uma diferença de temperatura muito grande ocorreu no início do evaporador, isso ocorre devido a inclinação favorável do tubo de calor, fazendo que o líquido bloqueia parcialmente o evaporador, elevando a temperatura.

Também foram feitos testes sem convecção forçada.

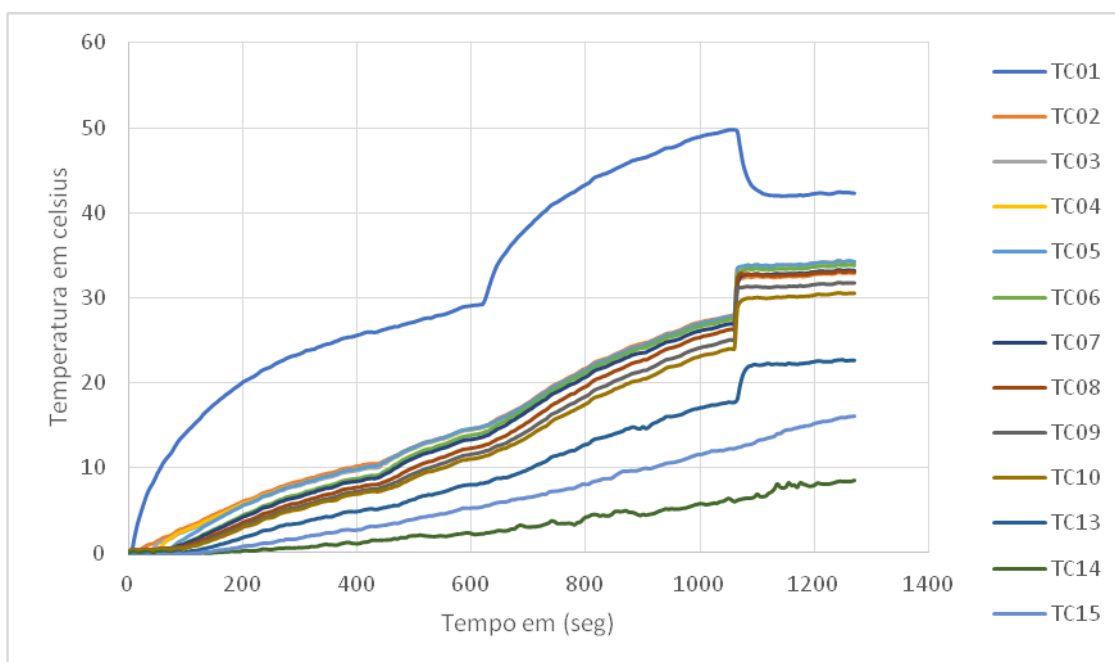
Figura 2.4.7– Temperatura em função do tempo, com inclinação favorável e sem resfriamento por convecção forçada.



Fonte: Produção do Autor.

Como pode-se observar na Figura 2.4.7, há o acúmulo de líquido, devido a inclinação favorável no evaporador, gerando o aumento de temperatura, pois o líquido bloqueou parcialmente o evaporador. Porém quando aumentou a potência do aquecedor, aproximadamente no momento de 700 segundos, intensificou a evaporação e apareceu uma bolha no início do evaporador; quando ela explodiu puxando esse excesso do líquido fora do evaporador e liberando a área de troca de calor, o tubo de calor voltou a funcionamento normal já sem este bloqueio parcial, diminuindo a temperatura. No instante 150 segundos foi também observada uma rápida queda de temperatura, possivelmente por causa a uma formação de uma bolha pequena ou erro de leitura dos dados na controladora. Com a presença desse fenômeno o teste foi repetido a fim de verificar se iria ocorrer novamente a presença de bolhas.

Figura 2.4.8 – Segundo teste, representando temperatura em função do tempo, no life-test-1, com inclinação favorável e sem resfriamento por convecção forçada.



Fonte: Produção do Autor.

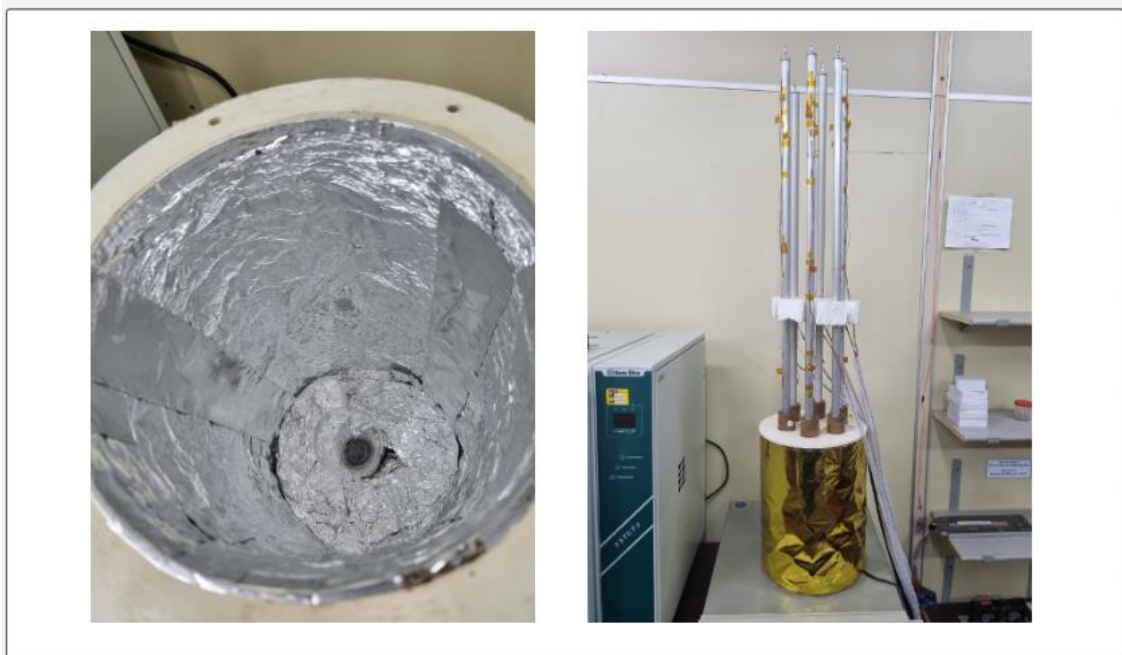
Ao analisar atentamente a Figura 2.4.8, pode-se observar novamente a ocorrência do fenômeno de uma bolha, em aproximadamente 1080 segundos (comparado ao teste anterior, que ocorreu em cerca de 940 segundos). Essa observação comprova que o fenômeno se repete e ocorre em momentos semelhantes ao longo dos testes realizados. Essa repetição reforça a consistência e a previsibilidade desse fenômeno no comportamento do tubo de calor em condições semelhantes.

Após a realização dos testes, comparando os gráficos obtidos com os testes feitos por alunos anteriores, é possível afirmar que ainda não há presença significativa de gás GNC no tubo de calor. Os dados obtidos contribuíram para compreender o comportamento do tubo de calor, em situações práticas, além de permitir verificar o tempo de vida útil do tubo.

2.4.2 Life-Test-2

No *life-test-2*, foi realizada uma manutenção no recipiente. O corpo cilíndrico do recipiente apresentava uma grande quantidade de sujeira, além de uma substância viscosa, possivelmente cola derretida. O revestimento interno do cilindro era feito de teflon, um material inadequado para o experimento, uma vez que uma lâmpada incandescente era colocada dentro do cilindro, e o teflon atuava como um refletor, transmitindo calor para os tubos de alumínio. Com o passar dos anos, o material se degradou. Para realizar a manutenção, foi realizada uma limpeza interna e aplicado um revestimento de papel alumínio. Para a colagem, foi feita uma pesquisa para encontrar colas adequadas para trabalhos em alta temperatura, e foi utilizada uma cola de base de silicone. Além disso, com a assistência do departamento de elétrica, toda a parte elétrica interna do corpo cilíndrico foi refeita para garantir o uso seguro da lâmpada, uma vez que o papel alumínio pode conduzir eletricidade. Por falta informação, não foram registradas fotografias para ilustrar as condições que o *life-test-2*, se encontrava, porém as Figuras 2.4.9, ilustram a atual condição após a manutenção.

Figura 2.4.9 – Ilustra o *Life-test-2*, após a reforma.



Fonte: Produção do Autor.

2.4.3 Estudo experimental do tubo de calor em diferentes ângulos de inclinação: avaliação do fenômeno de dry out

As características do tubo utilizado são representadas na tabela 2.4.3.

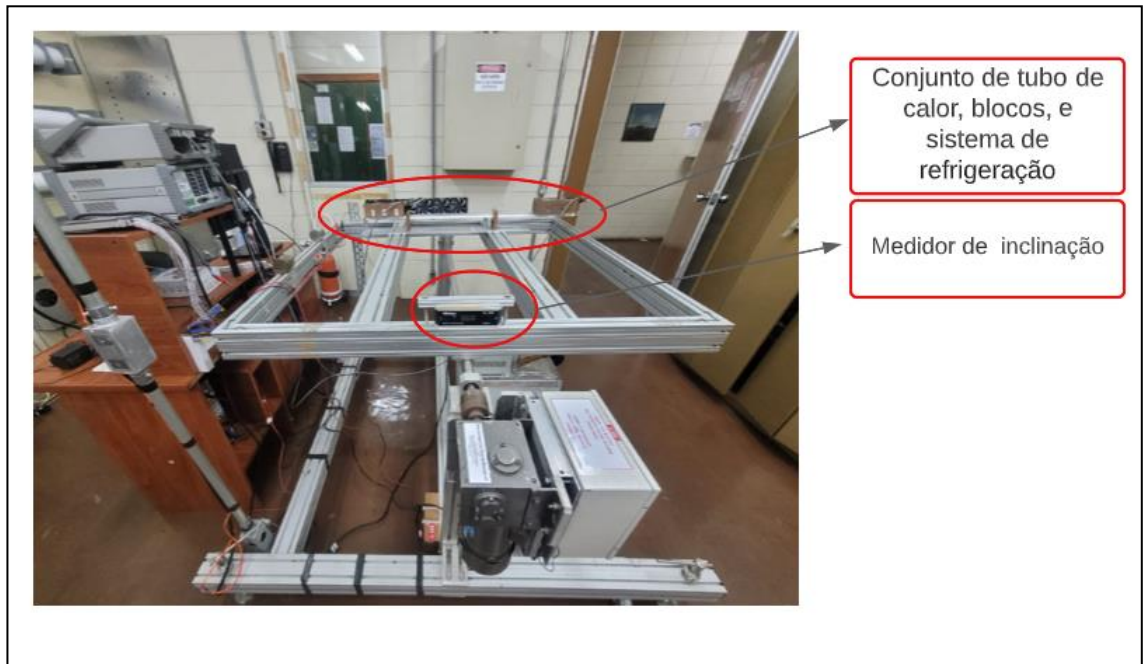
Tabela 2.4.3 – Representa as características físicas do tubo de calor carregado com amônia.

Comprimento total	760 mm	Comprimento do evaporador	205 mm
Diâmetro Externo	9,3 mm	Comprimento do condensador	240 mm
Área da seção transversal	196,7 mm ²	Número de identificação	ZY-1/RBBE/70-0/F3F4E-2/HP07B/090826

Fonte: Produção do Autor.

Para conduzir os testes, foi adotado o seguinte critério: aumentar a inclinação em 0,1 ° do lado da resistência, forçando o líquido presente dentro tubo fique na extremidade oposta à resistência, conforme demonstra a figura 1. A cada aumento de inclinação foi deixado 20 minutos o tubo fixado, para verificar se ele continua funcionando, porém a cada término de um teste, foi deixado o tubo esfriar e depois realizado novos testes.

Figura 2.4.10 – Ilustra o setup utilizado



Fonte: Fotografia realizada pelo Autor.

Tabela 2.4.4 – Características físicas das ventoinhas utilizadas durante o experimento.

Quantidade	6
Dimensões	80x80x20 mm
Corrente	0,08A
Tensão	12VDC
Rotação	2000RPM \pm 10%

Fonte: Manual do fabricante.

A Figura 2.4.11, representa a configuração do software utilizado “*Agilent Benchlink Data Logger*”, esta configuração está salva para uso dentro do programa, nome do arquivo é: LIFETEST4_03MAIO2023-2.

Figura 2.4.11 – Representa como foram configurados os termistores.

Channel			Measurement		
ID	Scale	Name	Function	Range	Resoluti
101	<input checked="" type="checkbox"/>	TH04	Temp 10K Therm		
102	<input type="checkbox"/>		Temp 10K Therm		
103	<input checked="" type="checkbox"/>	TH02 FONTE	Temp 10K Therm		
104	<input type="checkbox"/>		Temp 10K Therm		
105	<input checked="" type="checkbox"/>	TH05	Temp 10K Therm		
106	<input type="checkbox"/>		Temp 10K Therm		
107	<input checked="" type="checkbox"/>	TH07	Temp 10K Therm		
108	<input checked="" type="checkbox"/>	TENSAO	DC volts	Auto	5.5 digits
109	<input type="checkbox"/>		DC volts	Auto	5.5 digits
110	<input checked="" type="checkbox"/>	TH06	Temp 10K Therm		
111	<input type="checkbox"/>		DC volts	Auto	5.5 digits

Fonte: Produção do Autor.

Inicialmente, foram realizados testes estáticos, nos quais o tubo de calor foi submetido a inclinações desfavoráveis pré-determinadas, variando de forma incremental. As temperaturas foram registradas em intervalos regulares para analisar a eficiência do tubo de calor em diferentes condições.

Posteriormente, foram conduzidos testes dinâmicos, nos quais a inclinação do tubo de calor foi variada continuamente ao longo do tempo. Essa abordagem permitiu simular situações mais próximas das condições reais de operação.

Para avaliar a influência da potência, foram realizados testes em diferentes níveis de potência, incluindo 15, 20, 25 e 30 watts.

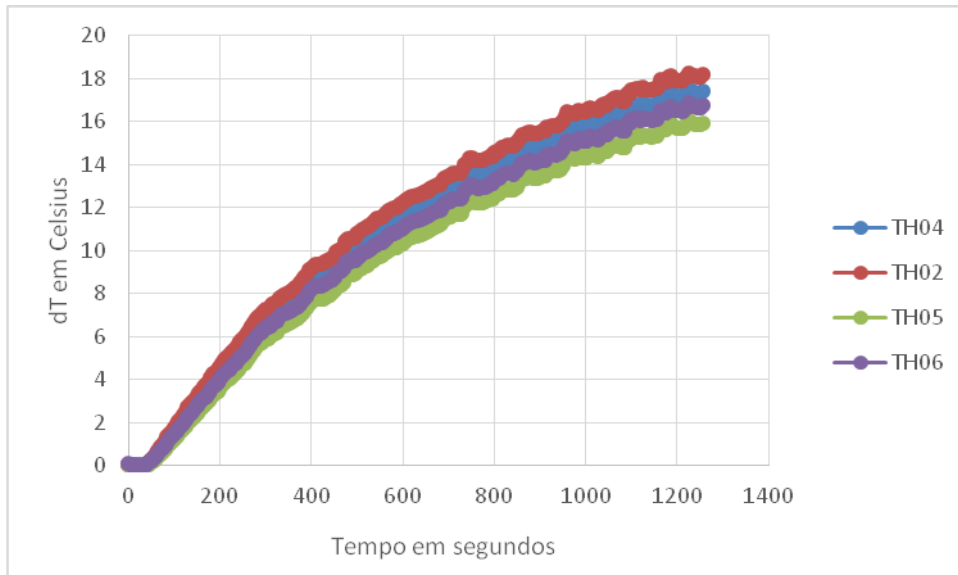
Com a participação do aluno de doutorado orientado pelo professor, foram adotadas novas técnicas nos laboratórios para o teste de delta ambiente, diferente do Life-test-1. O critério estabelecido consiste em calcular a diferença entre a primeira temperatura ambiente registrada e as subsequentes em diferentes momentos. Com base nesse delta, é possível determinar se a temperatura ambiente diminuiu ou aumentou. Quando há uma variação positiva, significa que a temperatura ambiente diminuiu. Nesse caso, subtrai-se esse delta da temperatura do termistor e, em seguida, subtrai-se novamente a temperatura

ambiente inicial. Por outro lado, se a temperatura em outro instante for maior que a temperatura de origem, soma-se o delta ao invés de subtrair e, em seguida, subtrai-se a temperatura ambiente inicial.

A seguir será apresentado os dados obtidos com ensaios de inclinação neutra.

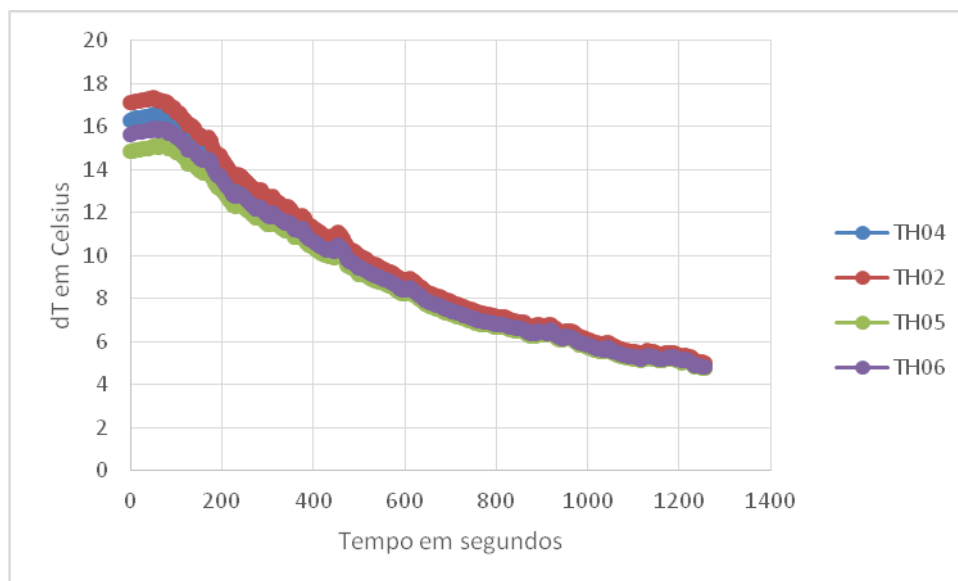
As Figuras 2.4.12 e 2.4.13 apresentadas a seguir ilustram os testes conduzidos com inclinação neutra e potência de 20 watts, sem o uso de refrigeração forçada. Esses gráficos proporcionam uma visualização dos resultados obtidos durante os experimentos. Cada teste manteve o padrão de 20 minutos.

Figura 2.4.12 – Representa o desempenho do tubo de calor em uma inclinação neutra, sem convecção forçada, no período de aquecimento.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 2.4.13 – Representa o desempenho do tubo de calor em uma inclinação neutra, sem convecção forçada no período de resfriamento.

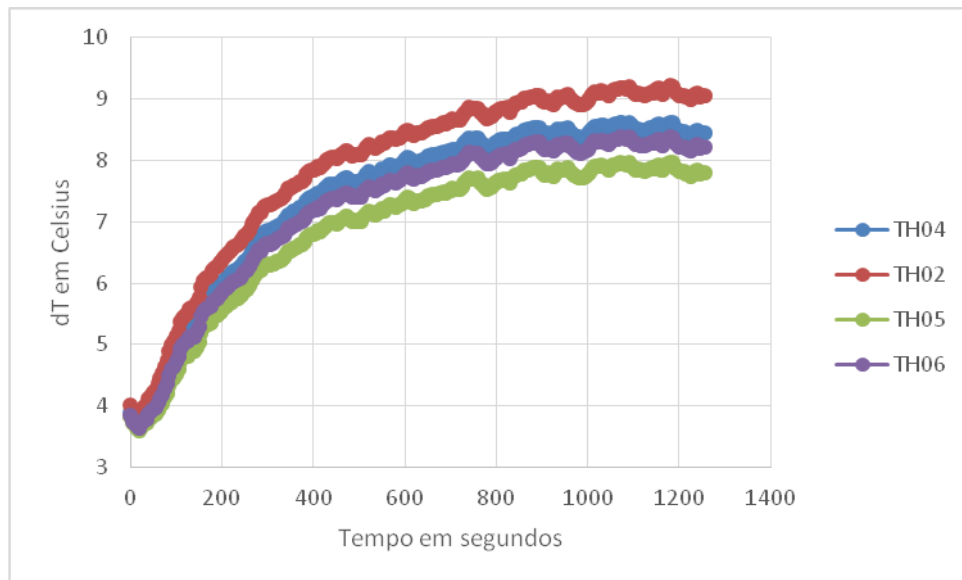


Fonte: Produção do Autor

As Figuras 2.4.14 e 2.4.15 exibidas abaixo mostram os resultados dos testes realizados com inclinação neutra e potência de 20 watts, porém, nesse caso com

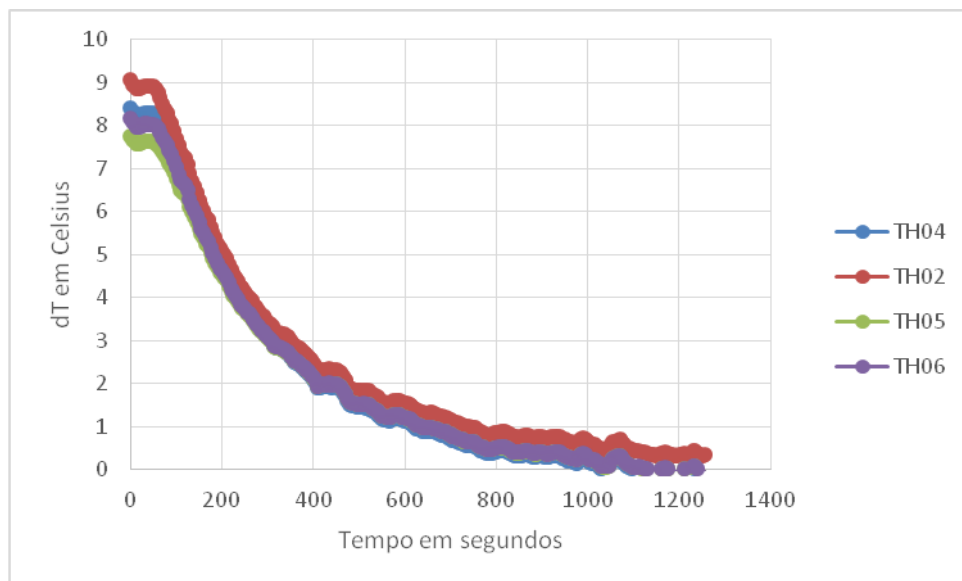
o emprego de refrigeração forçada. Esses gráficos ilustram o impacto da refrigeração forçada nos resultados obtidos durante os experimentos.

Figura 2.4.14 – Representa o desempenho do tubo de calor em uma inclinação neutra, com convecção forçada, no período de aquecimento.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 2.4.15 – Representa o desempenho do tubo de calor em uma inclinação neutra, com convecção forçada, no período de refrigeração.

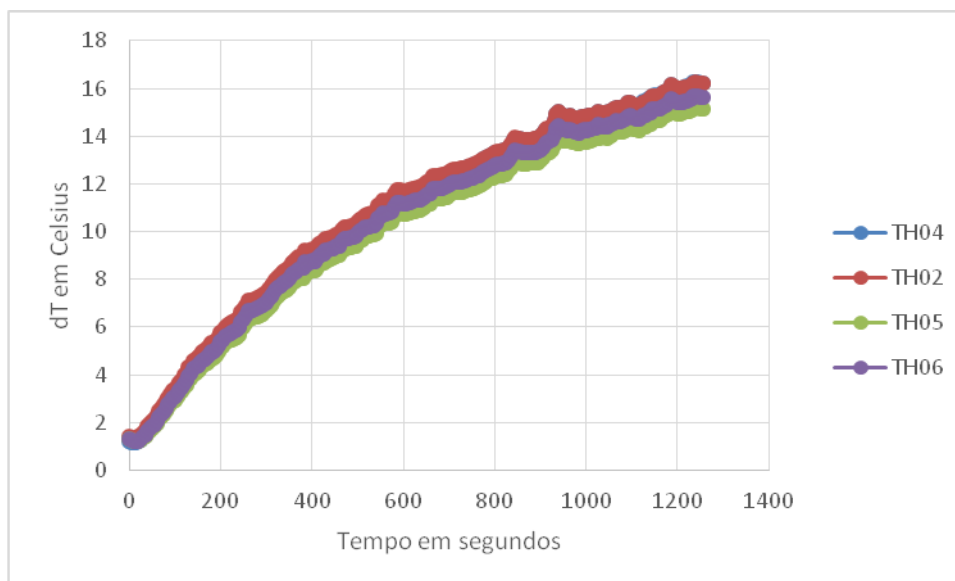


Fonte: Produção do Autor.

Ao analisar a Figura 2.4.15, é evidente que o desempenho do tubo de calor durante o período de refrigeração é superior quando se usa convecção forçada. Ao examinar o gráfico, é possível observar que as temperaturas registradas são mais baixas em comparação à temperatura ambiente coletada. Isso indica que a refrigeração forçada proporciona uma dissipação de calor mais eficiente, resultando em temperaturas mais baixas do que aquelas alcançadas sem a utilização de convecção forçada, representada pela Figura 2.4.13. Analiticamente, comprando as Figuras 2.4.13 e 2.4.15 pode-se observar um delta das temperaturas regiões de aquecimento onde, é aproximadamente 9 graus mais frio quando é utilizado convecção forçada.

Abaixo será apresentado os dados obtidos através dos ensaios de inclinação desfavorável na potência de 15 watts e sem convecção forçada. Os testes seguiram a mesma metodologia. Os dados coletados demonstram que até uma inclinação $0,60^\circ$ não favorável o tubo de calor funciona de modo bem eficiente e quando é submetido a uma inclinação de $0,70^\circ$ desfavorável, ele chega no ponto de *dry out* parcial e a inclinação de $0,80^\circ$ ocorre *dry out* total. Nas imagens 2.4.18 e 2.4.20 corresponde respectivamente ao *dry out* parcial e ao *dry out* total.

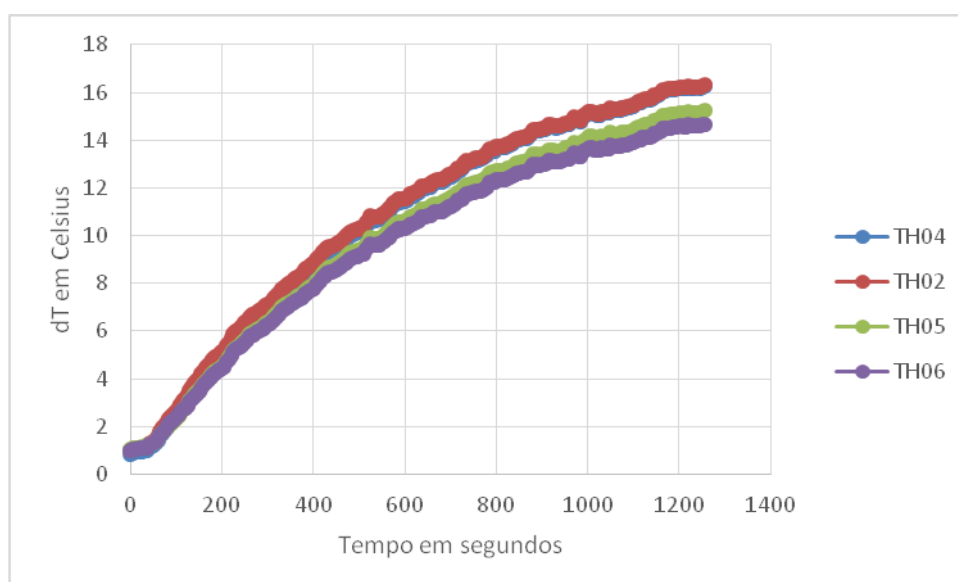
Figura 2.4.16 – Teste realizado com inclinação de 0,2° desfavoráveis, na potência de 15 watts e sem convecção forçada.



Fonte: Produção do Autor.

Os testes realizados na inclinação de 0,3 até 0,5 apresentam um gráfico muito semelhante com a inclinação 0,2 por isso não serão inseridos.

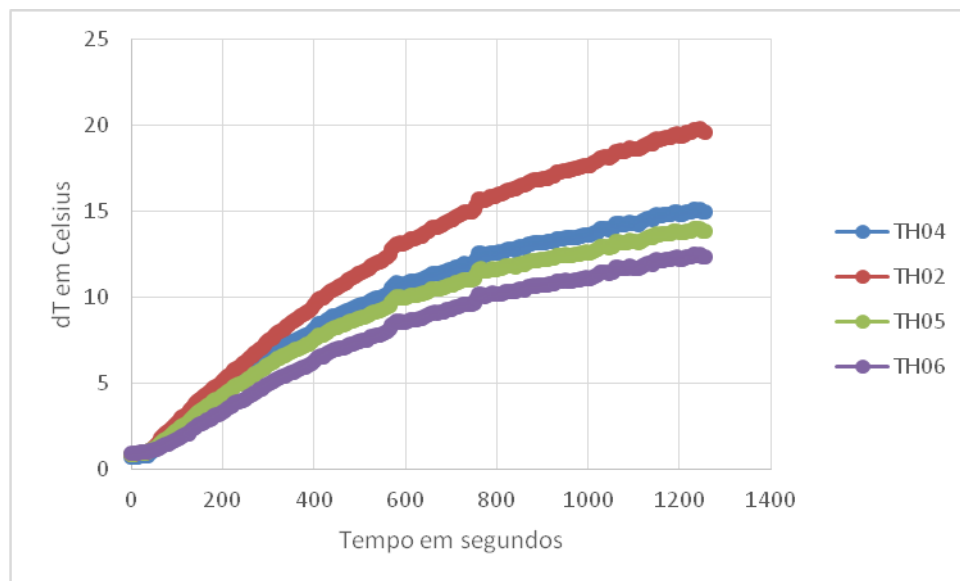
Figura 2.4.17 – Teste realizado com inclinação de 0,6° desfavoráveis, na potência de 15 watts e sem convecção forçada.



Fonte: Produção do Autor.

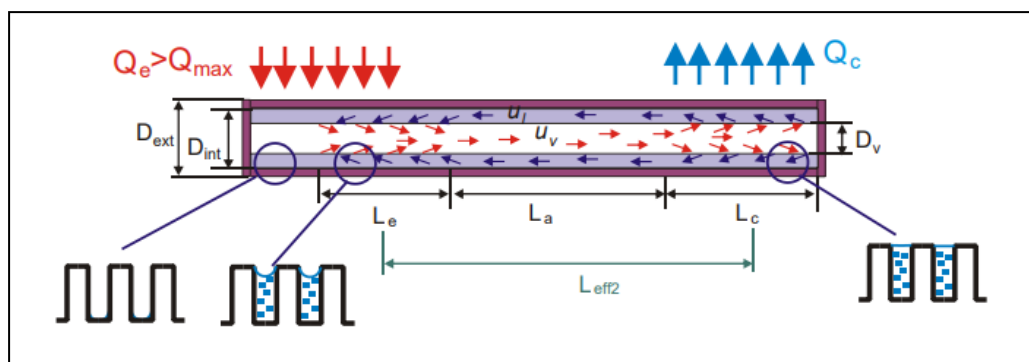
A partir das inclinações de 0,6 graus e 0,7 graus, claramente desfavoráveis, é perceptível que o tubo de calor apresenta perda de eficiência. Essa ocorrência pode ser associada ao fenômeno de *dry out* parcial. No entanto, a partir da inclinação de 0,8 graus, o tubo de calor perde totalmente sua eficiência, caracterizando o fenômeno de *dry out* total.

Figura 2.4.18 – Teste realizado com inclinação de 0,7° desfavoráveis, na potência de 15 watts e sem convecção forçada.



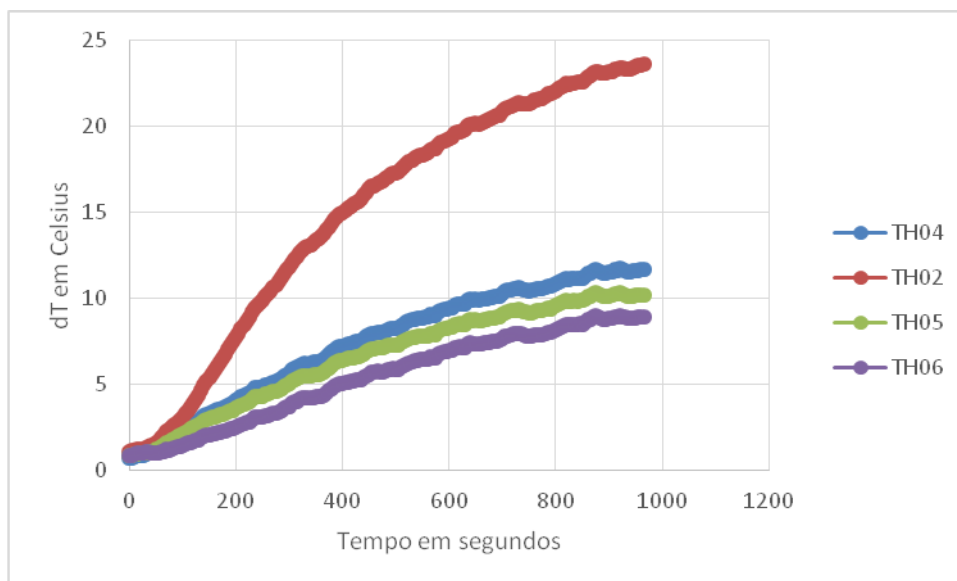
Fonte: Produção do Autor.

Figura 2.4.19 – Representação do fenômeno *dry out* parcial.



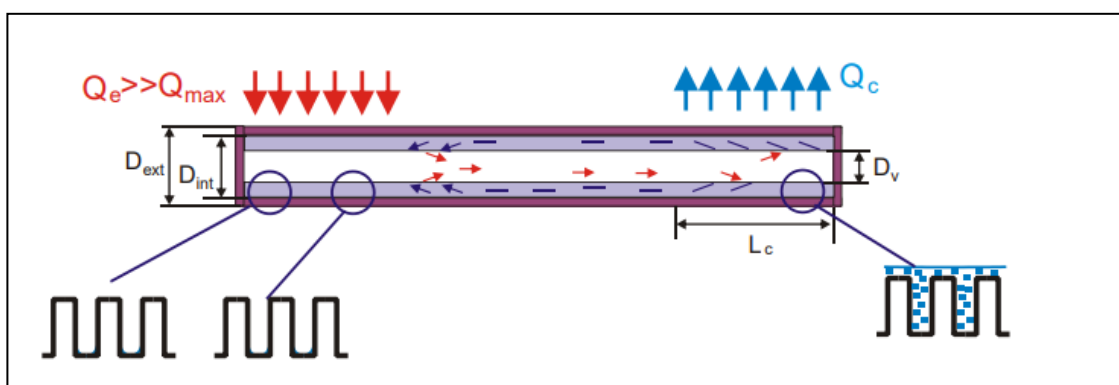
Fonte: Produção do Orientador Valeri Vlassov.

Figura 2.4.20 – Teste realizado com inclinação de 0,8° desfavoráveis, na potência de 15 watts e sem convecção forçada.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 2.4.21 – Representação do dry out total.



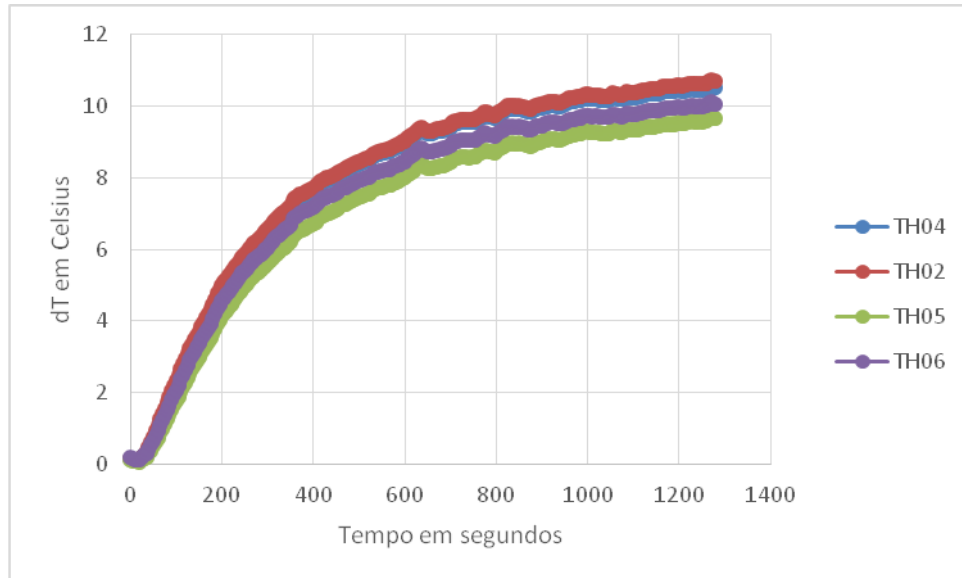
Fonte: Produção do Orientador Valeri Vlassov.

Para investigar a influência da potência nesse fenômeno, foram realizados testes adicionais com potências mais elevadas. O objetivo era verificar se o efeito de *dry out* total poderia ocorrer em inclinações desfavoráveis menores.

Conforme a revisão bibliográfica, constatou-se que a potência exerce uma influência significativa nesse fenômeno, permitindo que ocorra em inclinações menores. Ao aumentar a potência para 20 watts, verificou-se que o *dry out* total

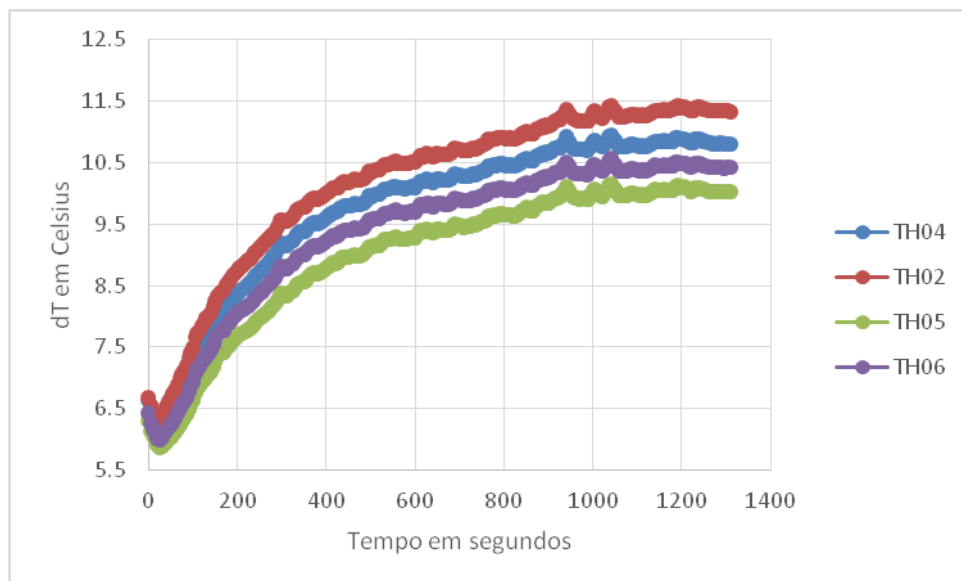
ocorreu em inclinações desfavoráveis de 0,6 graus, reduzindo em 0,2 graus em comparação ao teste anterior. A seguir as imagens representam os dados obtidos através dos ensaios realizados.

Figura 2.4.22 – Teste realizado com inclinação de 0,2° desfavoráveis na potência de 20 watts e convecção forçada.



Fonte: Produção do Autor.

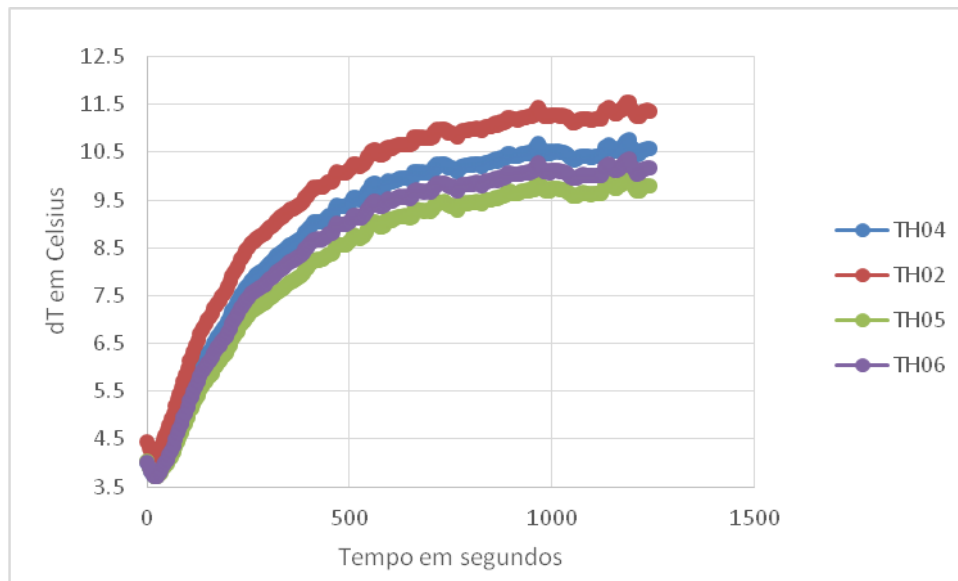
Figura 2.4.23 – Teste realizado com inclinação de 0,3° desfavoráveis na potência de 20 watts e convecção forçada.



Fonte: Produção do Autor.

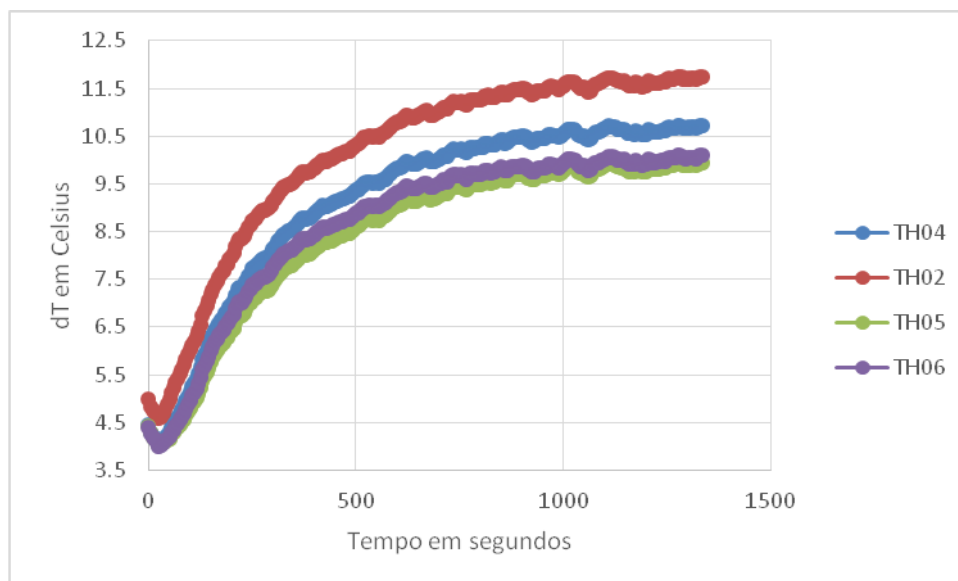
Possivelmente, por causadas variações de temperatura ambiente, é possível verificar que o ensaio na inclinação de 0,3 graus desfavorável obteve uma temperatura menor, do que no ensaio de 0,2 graus.

Figura 2.4.24 – Teste realizado com inclinação de 0,4° desfavoráveis na potência de 20 watts e convecção forçada.



Fonte: Produção do Autor.

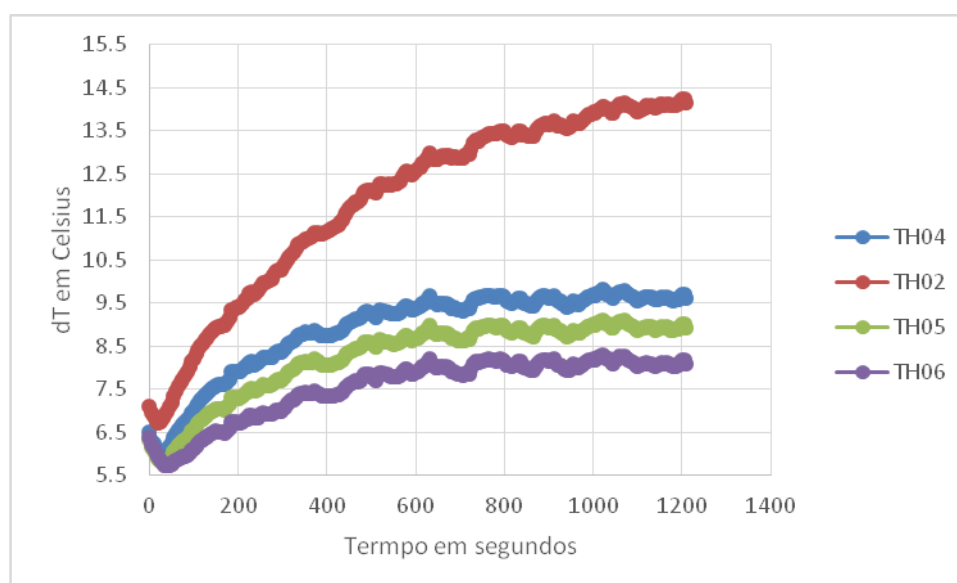
Figura 2.4.25 – Teste realizado com inclinação de 0,5° desfavoráveis na potência de 20 watts e convecção forçada.



Fonte: Produção do Autor.

Ao analisar a imagem 2.4.25, que representa o gráfico obtido durante o ensaio com a inclinação de 0,5 graus, torna-se evidente que o tubo de calor começa a perder eficiência nesse nível de inclinação.

Figura 2.4.26 – Teste realizado com inclinação de 0,6° desfavoráveis na potência de 20 watts e convecção forçada.



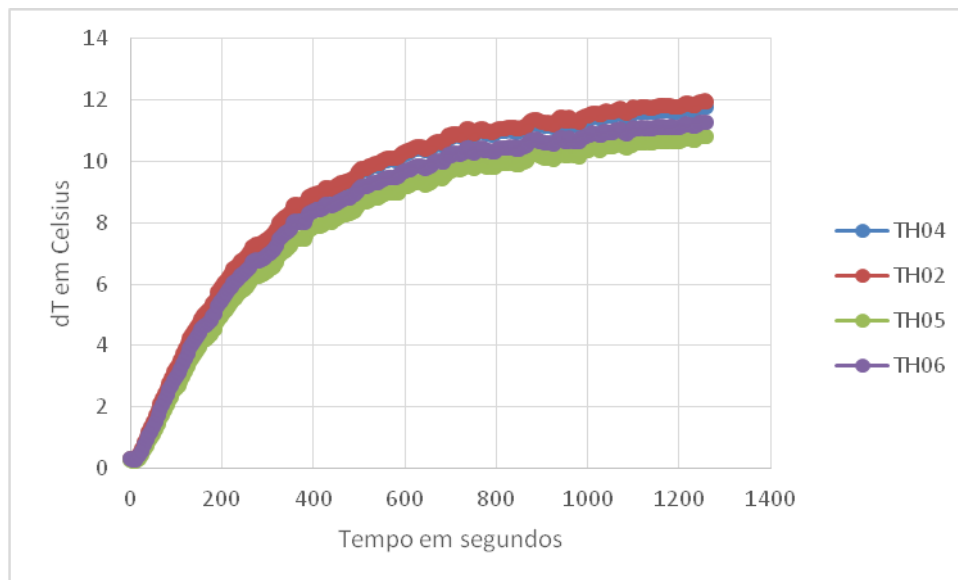
Fonte: Produção do Autor.

Analisando a Figura 2.4.26, o tubo quando submetido uma inclinação de 0,6 graus desfavorável, ocorre o fenômeno *dry out* total.

Novamente com objetivo investigar se o tubo de calor perde eficiência de forma ainda mais rápida, aumentamos novamente a potência em nossos experimentos.

É importante ressaltar que os testes a seguir, foram realizados com uma potência de 25 watts e contaram com refrigeração forçada.

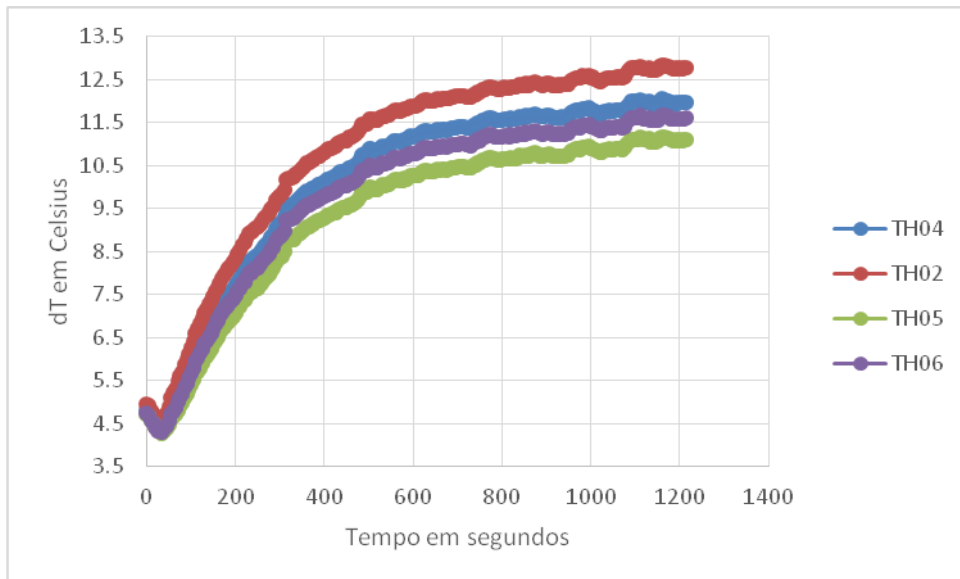
Figura 2.4.27 – Teste realizado com inclinação de 0,2° desfavoráveis na potência de 25 watts e convecção forçada.



Fonte: Produção do Autor.

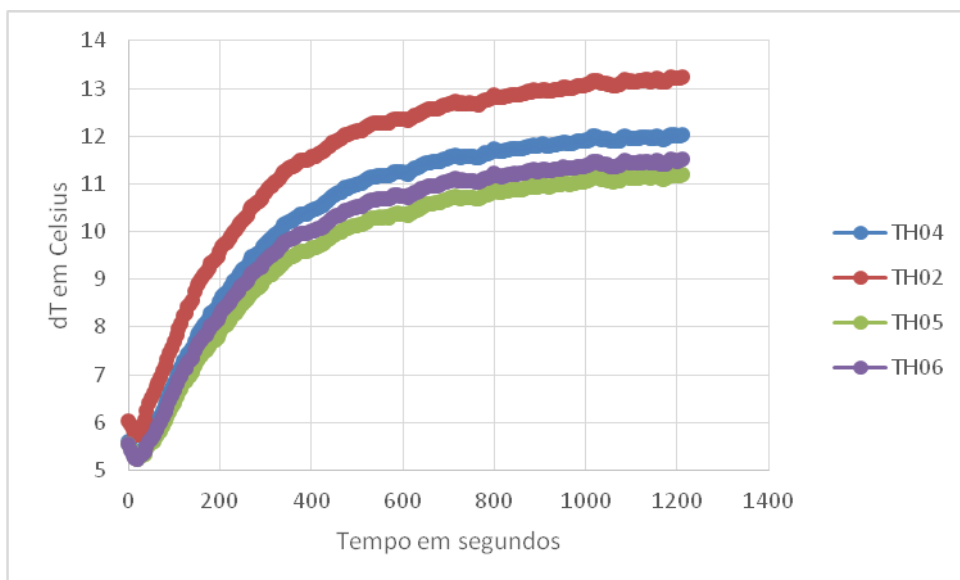
O teste realizado em uma inclinação de 0,3 ° desfavoráveis, é muito semelhante a 0,2° desfavoráveis.

Figura 2.4.28 – Teste realizado com inclinação de 0,4° desfavoráveis na potência de 25 watts e convecção forçada.



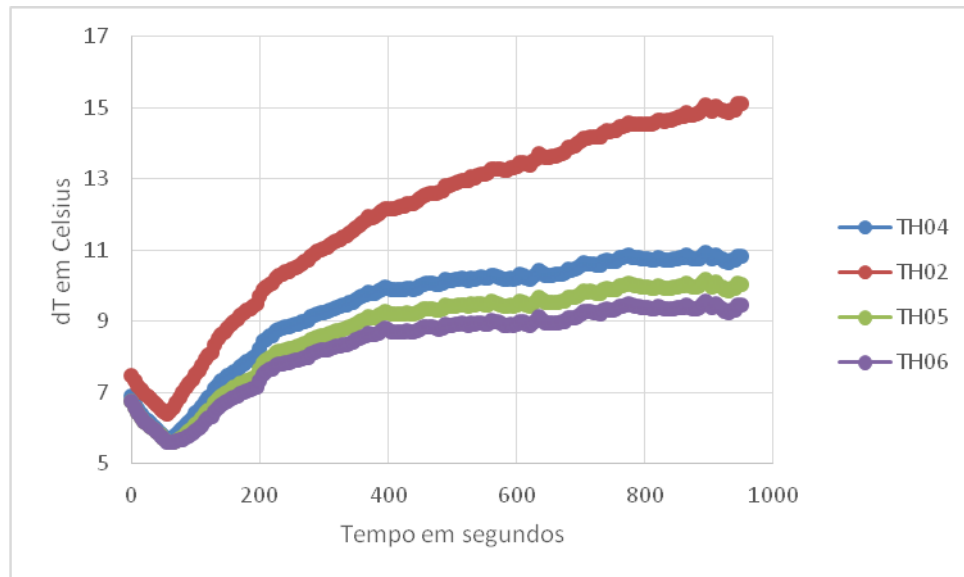
Fonte: Produção do Autor.

Figura 2.4.29 – Teste realizado com inclinação de 0,5° desfavoráveis na potência de 25 watts e convecção forçada.



Fonte: Produção do Autor.

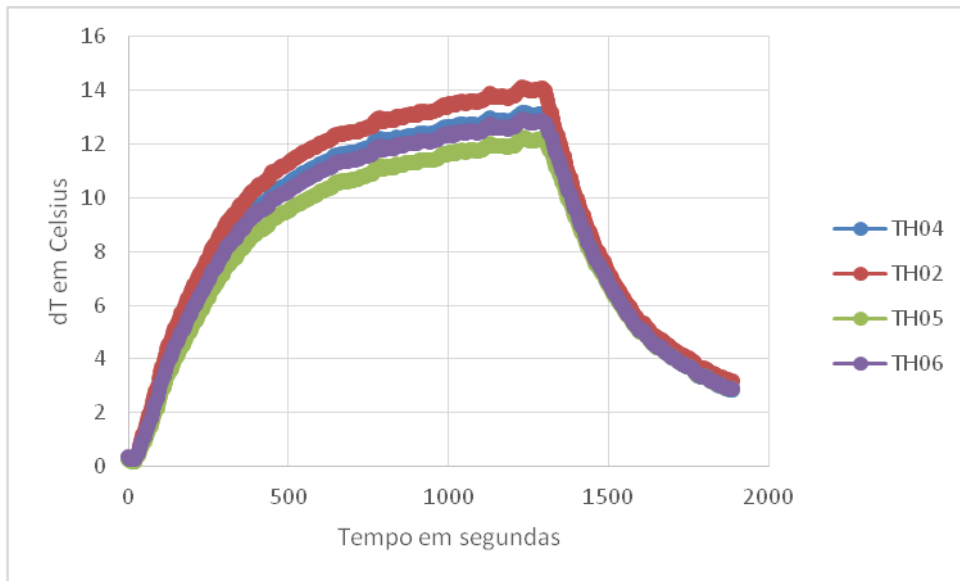
Figura 2.4.30 – Teste realizado com inclinação de 0,6° desfavoráveis na potência de 25 watts e convecção forçada.



Fonte: Produção do Autor.

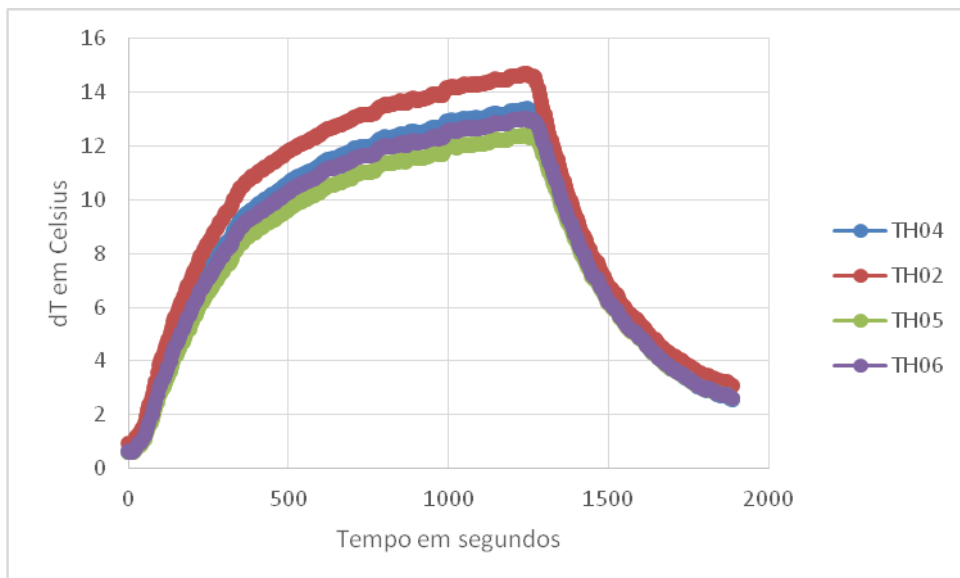
Por fim, foram feitos os testes na potência de 30 watts, teve-se uma ideia de coletar dados para verificar o comportamento do tubo no período de refrigeração, o sistema de convecção forçada ficou ligado durante os testes inteiro, desde o período de aquecimento. O período de refrigeração apenas foi desligado a fonte, manteve-se o padrão dos testes anteriores, fase de aquecimento de 20 minutos, e depois foi coletado 10 minutos adicionais para verificar o desempenho da transferência de calor do tubo, em determinada inclinação a fim de comparar, com o período de refrigeração do tubo de calor em inclinação neutra. Os gráficos seguem a mesma metodologia presente nos gráficos acima.

Figura 2.4.31 – Teste realizado com inclinação de 0,2° desfavoráveis na potência de 30 watts e convecção forçada.



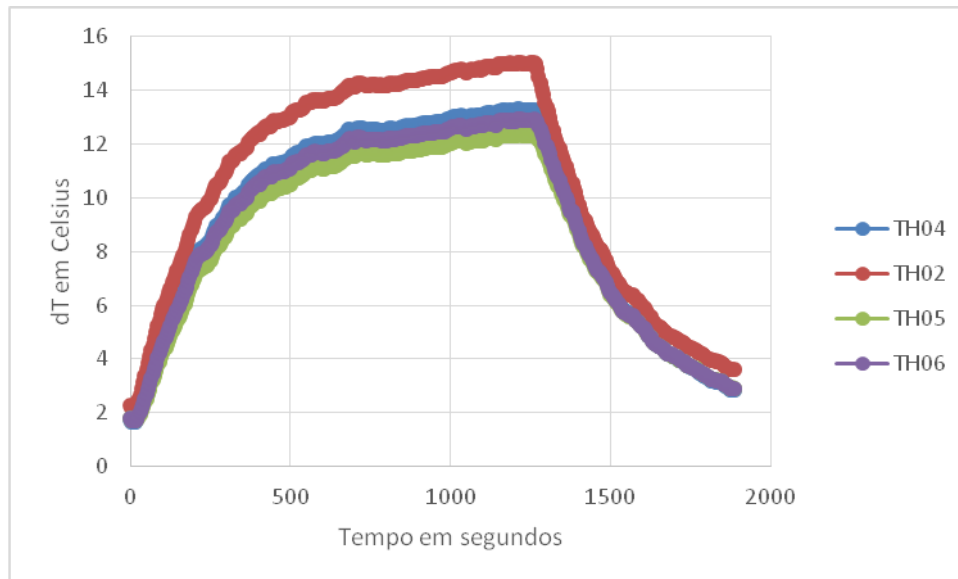
Fonte: Produção do Autor.

Figura 2.4.32 – Teste realizado com inclinação de 0,3° desfavoráveis na potência de 30 watts e convecção forçada.



Fonte: Produção do Autor.

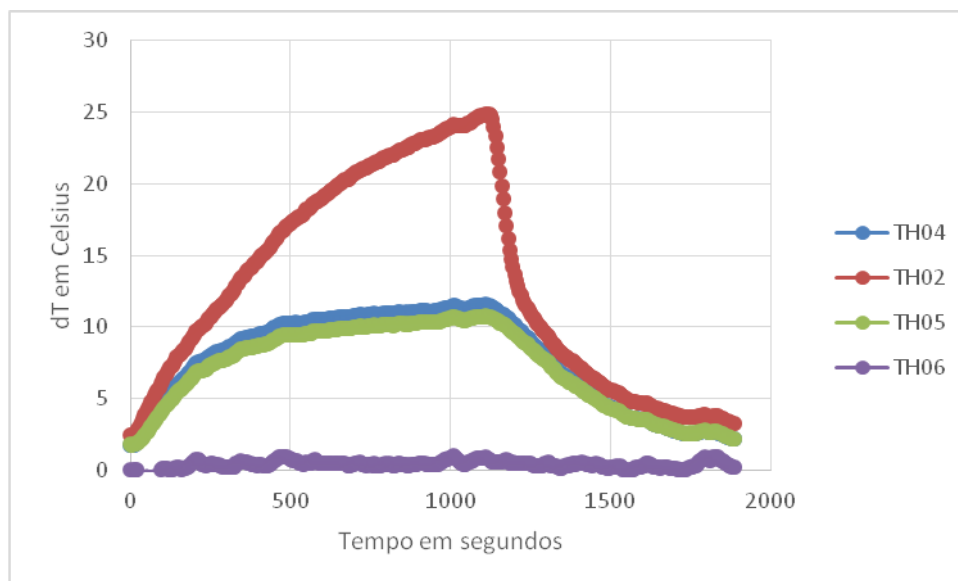
Figura 2.4.33 – Teste realizado com inclinação de 0,4° desfavoráveis na potência de 30 watts e convecção forçada.



Fonte: Produção do Autor.

Ao analisar o gráfico da imagem 2.4.33, é perceptível que, ao submeter o tubo de calor a uma inclinação desfavorável de 0,4 graus e com a potência de 30 watts, ele começa a perder eficiência.

Figura 2.4.34 – Teste realizado com inclinação de 0,5° desfavoráveis na potência de 30 watts e convecção forçada.



Fonte: Produção do Autor.

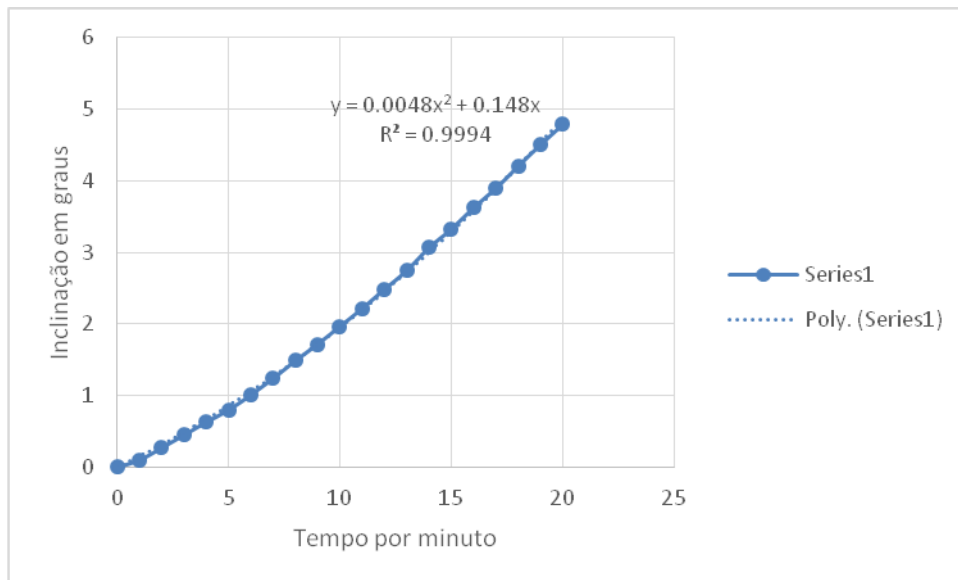
Ao analisar o gráfico da imagem 2.4.34, é possível observar que, ao submeter o tubo de calor a uma inclinação desfavorável de 0,5 graus e com a potência de 30 watts, ele perde total eficiência, ocorrendo fenômeno *dry out* total.

Os testes com inclinações dinâmicas têm a função de simular o comportamento do tubo de calor em situações mais próximas do cotidiano. Ao contrário dos testes estáticos, nos quais a inclinação é fixada antes do início do experimento, nos ensaios dinâmicos os testes são iniciados a partir da inclinação neutra (0 grau) e gradualmente aumentados até alcançar os 20 minutos de testes ou atingir o limite de segurança de 45 graus. Além disso, o motor da mesa giratória foi ajustado para a potência mínima, embora devamos observar que, devido à natureza analógica do regulador, não é possível garantir que a velocidade seja sempre a mesma em diferentes dias. Portanto, foram realizados testes preliminares para verificar se a mesa giratória estava operando dentro de uma faixa de velocidade padrão. Com esses testes preliminares foi verificado que a mesa não opera em velocidade padrão mesmo depois da potência já selecionada, havendo um desvio da inclinação em função do tempo.

A fim de contornar possíveis variações, durante o teste foram registradas as inclinações em intervalos de um minuto. Posteriormente, por meio de softwares e utilizando métodos de linearização, foi possível analisar os dados coletados e obter informações precisas sobre o comportamento do tubo de calor em relação ao tempo e às inclinações aplicadas.

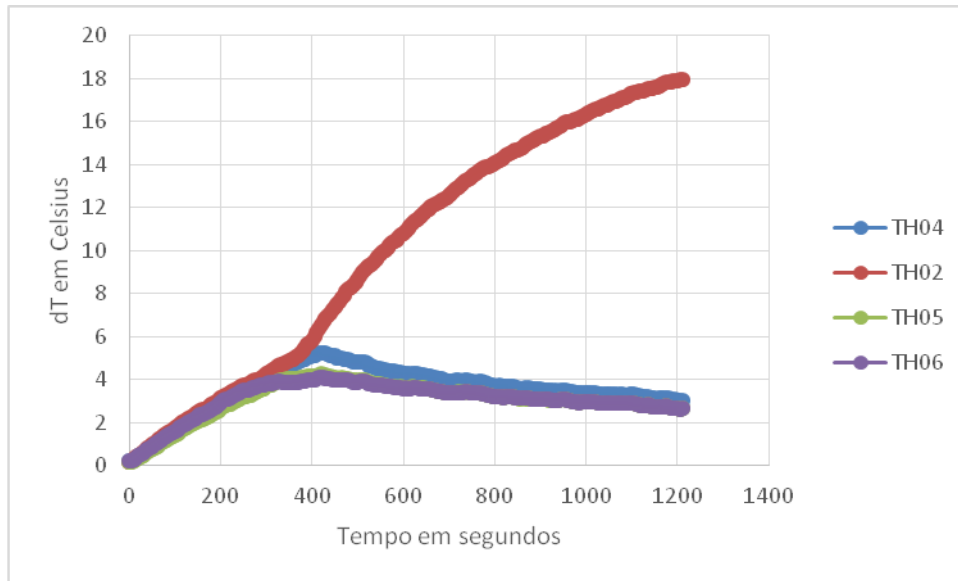
As Figuras 2.4.35 a 2.4.36 exibem os resultados obtidos durante o teste dinâmico realizado com uma potência de 10 watts e convecção natural. Esses gráficos ilustram as informações coletadas e fornecem o comportamento do sistema durante as variações de inclinação ao longo do tempo. Foi seguido a mesma metodologia para construção dos gráficos.

Figura 2.4.35 – Representa a inclinação em função do tempo por minuto.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 2.4.36 – O gráfico representa os dados obtidos através do ensaio.

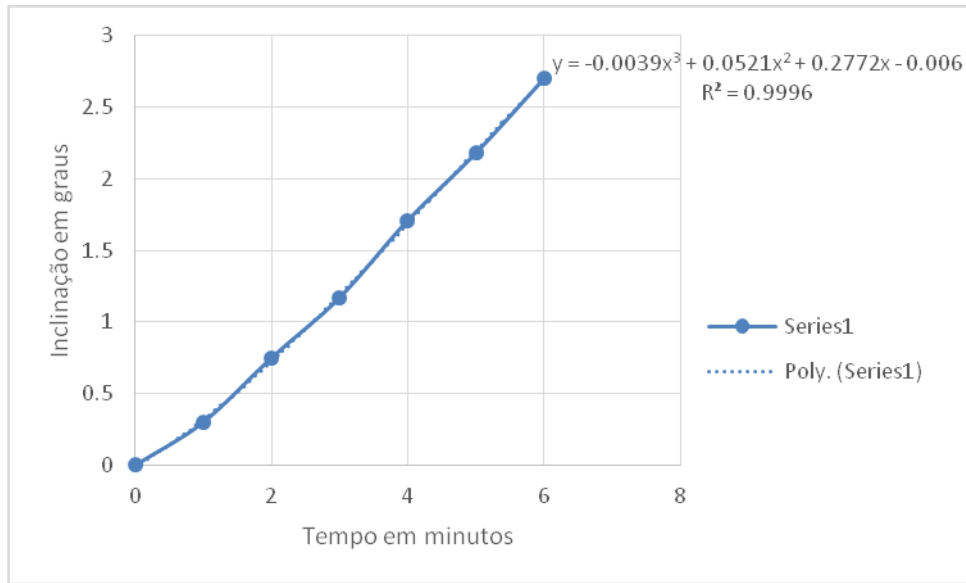


Fonte: Produção do Autor.

Ao analisar o gráfico apresentado na Figura 2.4.36, é perceptível que o fenômeno de *dry out* ocorre entre os intervalos de 250 a 400 segundos. Essa informação revela o período em que o tubo de calor atinge sua máxima perda de eficiência devido à evaporação completa do fluido de trabalho.

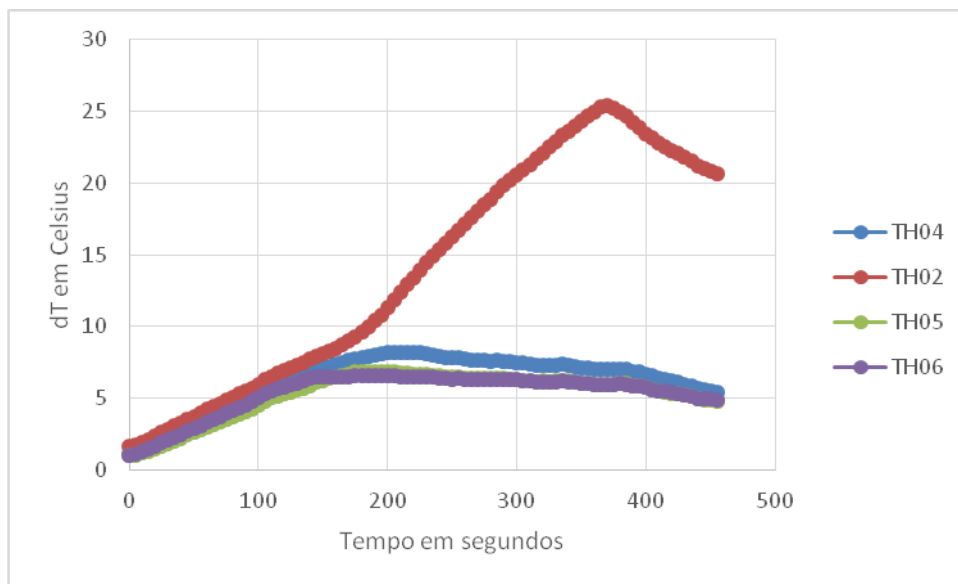
Com o intuito de verificar se o fenômeno de *dry out* ocorria mais cedo, foram conduzidos mais dois testes dinâmicos utilizando uma potência mais elevada de 30 watts. Esses testes visavam confirmar os resultados obtidos nos testes estáticos, nos quais o *dry out* ocorreu em momentos anteriores. No primeiro teste foi realizado sem convecção forçada.

Figura 2.4.37 – Representa a inclinação em função do tempo por minuto.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 2.4.38 – O gráfico representa os dados obtidos através do ensaio, na potência de 30 watts e sem refrigeração forçada.



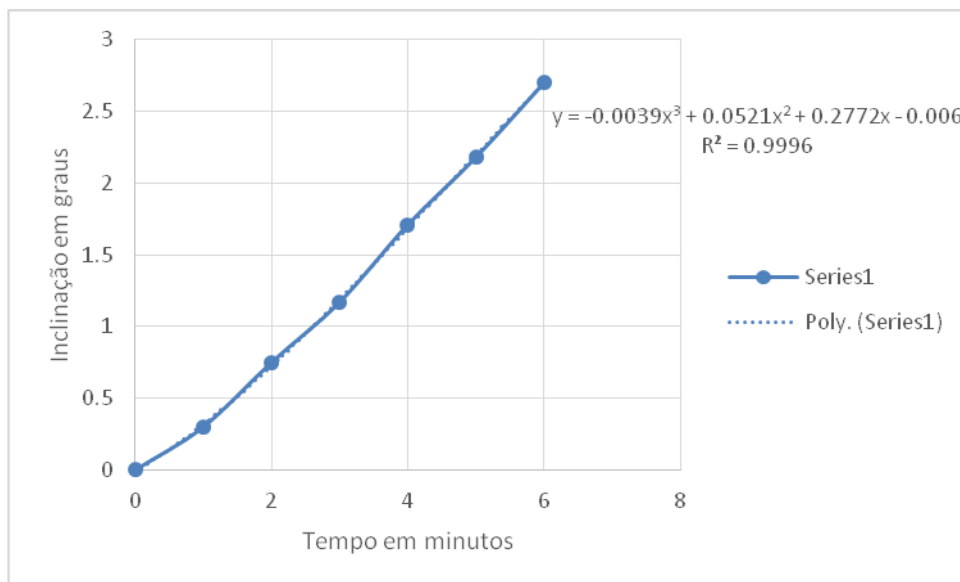
Fonte: Produção do Autor.

Ao analisar a Figura 2.4.38, é possível observar que o fenômeno de *dry out* inicia no intervalo entre 100 a 200 segundos. Essa informação indica o momento

em que o tubo de calor começa a perder sua eficiência devido à evaporação completa do fluido de trabalho.

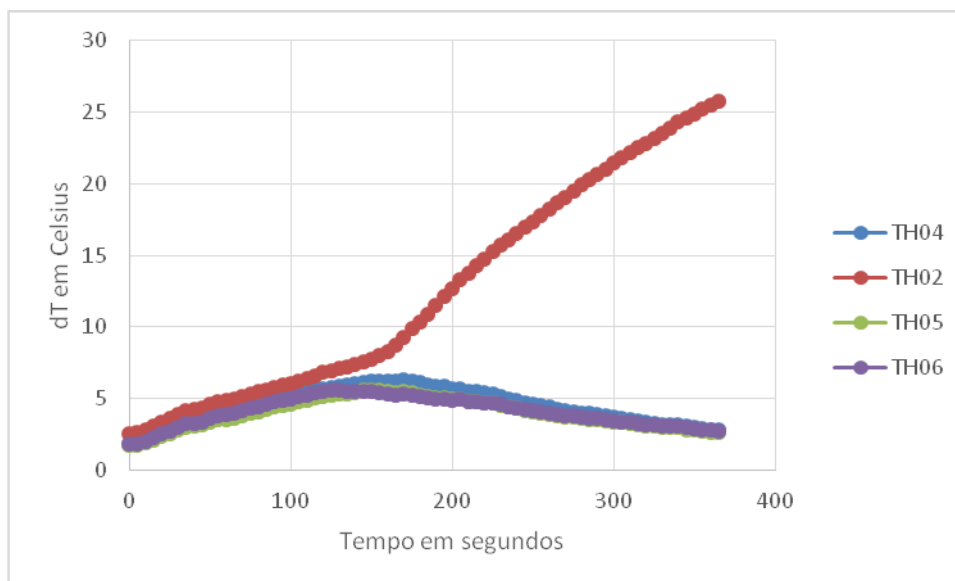
As Figuras 2.4.39 e 2.4.40 exibem os resultados obtidos durante o teste dinâmico realizado com uma potência de 30 watts e convecção forçada. Esses gráficos ilustram as informações coletadas e fornecem dados sobre o comportamento do sistema durante as variações de inclinação ao longo do tempo.

Figura 2.4.39 – Representa a inclinação em função do tempo por minuto.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 2.4.40 – O gráfico representa os dados obtidos através do ensaio, na potência de 30 watts e com refrigeração forçada.



Fonte: Produção do Autor.

Ao analisar atentamente a Figura 2.4.40, torna-se evidente que o fenômeno de "dry out" tem seu início entre 100 e 200 segundos. Essa observação indica o momento em que o tubo de calor começa a perder eficiência significativa devido à evaporação completa do fluido de trabalho. A análise do gráfico permite identificar o período crítico em que ocorre essa transição no desempenho do sistema.

Para realizar a análise dos dados e encontrar as tendências nos ensaios, foi utilizado o Excel. O Excel possibilitou a criação de gráficos para visualização dos resultados obtidos nos ensaios. Através do Excel, foi possível aplicar métodos de regressão para encontrar uma linha de tendência que melhor se ajustasse aos dados coletados. No primeiro ensaio, identificou-se uma tendência representada por uma função de segundo grau, enquanto nos ensaios 2 e 3, observou-se uma tendência mais complexa, que foi aproximada por uma função polinomial de terceiro grau. Essas análises matemáticas permitem extrair informações mais detalhadas e precisas dos dados experimentais, permitindo a compreensão das relações e padrões presentes nos resultados. Dessa forma, é possível obter uma descrição mais completa e acurada do comportamento do tubo de calor e do fenômeno de *dry out* em diferentes condições de teste.

Utilizando os polinômios definidos para cada ensaio e os gráficos plotados com a temperatura em função do tempo, é possível analisar em qual momento ocorreu o fenômeno de *dry out* em cada um dos ensaios. Ao substituir o segundo na função polinomial pela temperatura de referência que indica o *dry out*, podemos determinar o instante exato em que o fenômeno ocorreu.

Ao analisar cuidadosamente as Figuras 2.4.39, 2.4.43 e 2.4.47, podemos observar aproximadamente o momento em que ocorreu o fenômeno de *dry out*. Através da aplicação desses instantes nos polinômios definidos anteriormente e representados nas Figuras 2.4.36, 2.4.40, 2.4.44 é possível encontrar a inclinação correspondente.

Após a manipulação no Excel percebe-se que nos dois últimos testes 30W, a inclinação de modo tão semelhante que os polinômios obtidos são idênticos. A Tabela 2.4-3, representa os polinômios encontrados.

Tabela 2.4.5 –Representa os polinômios encontrados após análise numérica.

Figura	Potência	Polinômios
2.4.35	10W	$y = 0,0048x^2 + 0,148x$
2.4.37	30W	$y = -0,0039x^3 + 0,0521x^2 + 0,2772x - 0,006$
2.4.39	30W	$y = -0,0039x^3 + 0,0521x^2 + 0,2772x - 0,006$

Fonte: Produção do Autor.

A Tabela 2.4.4, representa os instantes em segundos encontrados analisando as Figuras 2.4.36, 2.4.40, 2.4.44. E aplicadas no polinômio representados pela Tabela 4.

Tabela 2.4.6 – Representa os valores da inclinação quando ocorreu o fenômeno *dry out*.

Figura	Instante em minutos	Aplicando na função	Unidade de medida
2.4.36	6,5	1,1648	graus
2.4.38	2,916666667	1,148945313	graus
2.4.40	2,5	0,9516875	graus

Fonte: Produção do Autor.

Após realizar os testes com inclinação desfavorável de forma estática e dinâmica, observou-se que o fenômeno de *dry out* ocorre de maneira mais rápida nos testes estáticos. Foi possível perceber a perda de eficiência gradual do tubo de calor à medida que a inclinação se aproxima do ponto em que ocorre o *dry out* total. Além disso, os experimentos permitiram comparar a eficiência do tubo de calor em inclinações neutras e desfavoráveis. Essa análise possibilitou observar claramente a diferença no desempenho do tubo em diferentes configurações, evidenciando a importância da inclinação na eficiência do sistema. Com testes confirmar a leitura revisão bibliográfica, além de trazer novos dados valiosos para estudos futuros, de tubos de calor com fluido de trabalho de amônia.

2.5 Desenvolvimento de uma calculadora térmica: análise dos limites operacionais do tubo de calor

Foi desenvolvida uma calculadora térmica para tubos de calor utilizando o Microsoft Excel. Essa calculadora permite ao usuário definir diferentes condições de entrada, como comprimento, diâmetro, fluido de trabalho, entre outros parâmetros relevantes. Com base nessas definições, a calculadora fornece automaticamente uma série de dados importantes para a análise do tubo de calor. Para desenvolver a calculadora, foi realizada uma revisão bibliográfica em livros sobre tubos de calor, utilizando as equações obtidas como base para as funcionalidades da calculadora. Essas equações, estão posicionadas ao lado dos resultados que serão exibidos aos usuários.

Figura 2.5.1 – Ilustra algumas equações utilizadas na calculadora.

The diagram displays several equations used in a thermal calculator, arranged in a grid-like structure. A callout box labeled "Capillary limit" points to a large central equation. The equations are as follows:

- $$\Delta P_{\text{cop,max}} = \frac{2\sigma \cos \theta_{\min}}{r_p}$$
- $$G_f = \frac{D_v \delta_p}{L_{\text{eff}} r_p}$$
- $$\Delta P_{v,\text{max}} = \frac{128 \mu_v Q_{\text{max},c} L_{\text{eff}}}{\lambda \pi D_v^4 \rho_v}$$
- $$N_i = \frac{\sigma \lambda \rho_l}{\mu_l}$$
- $$Y = \frac{\rho_l \mu_v}{\rho_v \mu_l}$$
- $$S = \left(\frac{r_p \rho_l g L}{\sigma L_{\text{eff}}} \right)$$
- $$L_{\text{eff}} = \frac{1}{2} L_e + L_a + \frac{1}{2} L_c$$
- $$L = L_e + L_a + L_c$$
- $$Q_{\text{max},c} = N_i G_f \frac{(2 \cos \theta_{\min} \mp S(\sin \beta))}{\left(\frac{1}{K \varepsilon \pi \left(1 + \frac{\delta_p}{D_v} \right)} + \frac{128 \delta_p^3 Y}{\pi D_v^3} \right)}$$
 (labeled as "Capillary limit")
- $$\Delta P_{l,\text{max}} = \frac{\mu_l Q_{\text{max},c} L_{\text{eff}}}{\lambda K \varepsilon \pi \rho_l \delta_p (D_v + \delta_p)}$$
- $$u_{v,\text{max}} = \frac{4 Q_{\text{max},c}}{\lambda \pi D_v^2 \rho_v}$$
- $$\Delta P_{g,\text{fill}} = \rho_l g (L \sin \beta + D_v + \delta_p)$$
- $$\Delta P_g = \rho_l g L \sin (\beta)$$

Fonte: Produção do Autor.

A interface da calculadora foi projetada para ser simples, agradável e fácil de usar, visando auxiliar estudantes de pós-graduação e mestrado na compreensão

dos parâmetros e no desenvolvimento técnico relacionado aos tubos de calor. As figuras, ilustram a calculadora, o desenvolvimento da calculadora além de conter o estudo das principais equações presentes nos tubos de calor, também foi desafiante a criação de um ambiente interativo e fácil para ser usado, além de ser agradável, rápido e prático para o usuário. Também foi adicionado instruções de como utilizar.

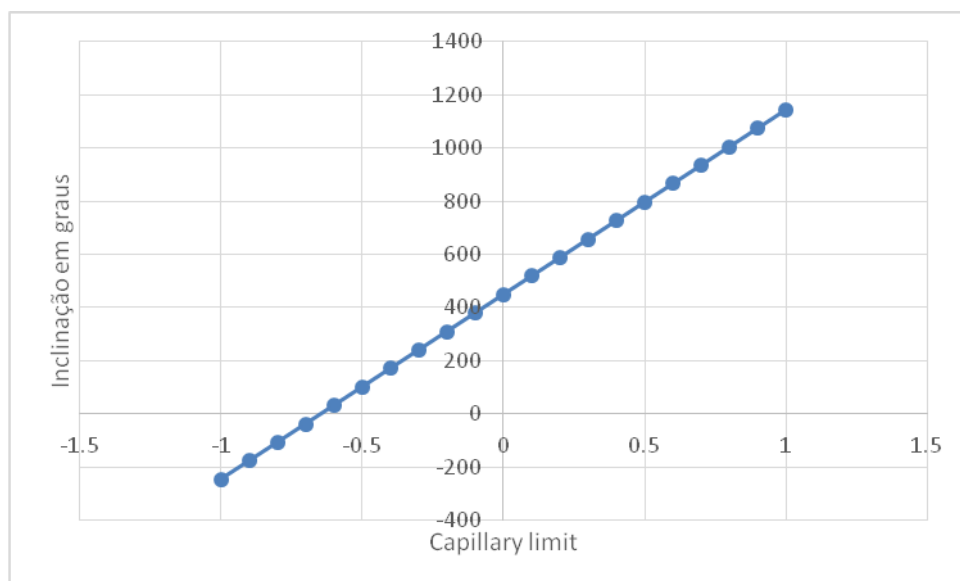
2.5.1 Análises dos resultados teóricos

A seguir, serão apresentados alguns dados gerados a partir da tabela desenvolvida e organizada para este estudo. Esses dados fornecem informações valiosas e relevantes relacionadas aos testes e experimentos realizados, permitindo uma compreensão mais aprofundada do fenômeno em análise.

2.5.2 Resultados de análise de influência de inclinação para limite capilar

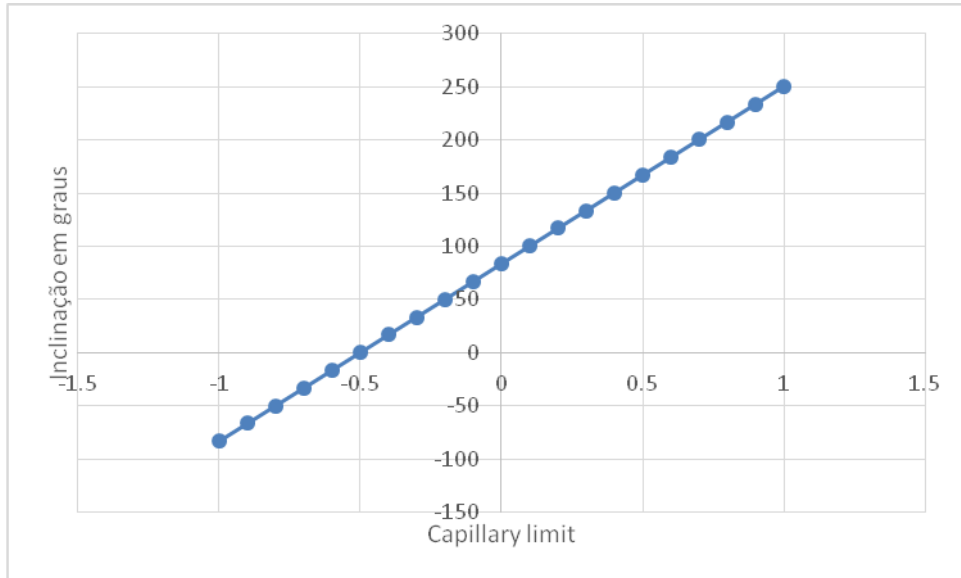
A seguir serão apresentados gráficos obtidos através de manipulações feitas através do uso da calculadora térmica desenvolvida pelo autor e orientadores responsáveis. Os gráficos representam a influência da inclinação para o limite capilar, foi feita análises de -1° a 1° , com um avanço de $0,1^\circ$. A seguir a análise foi feita com 3 fluidos diferentes na mesma temperatura 40°C , respectivamente amônia, acetona e água.

Figura 2.5.2 – Ilustra a influência para o fluido amônia 40°C .



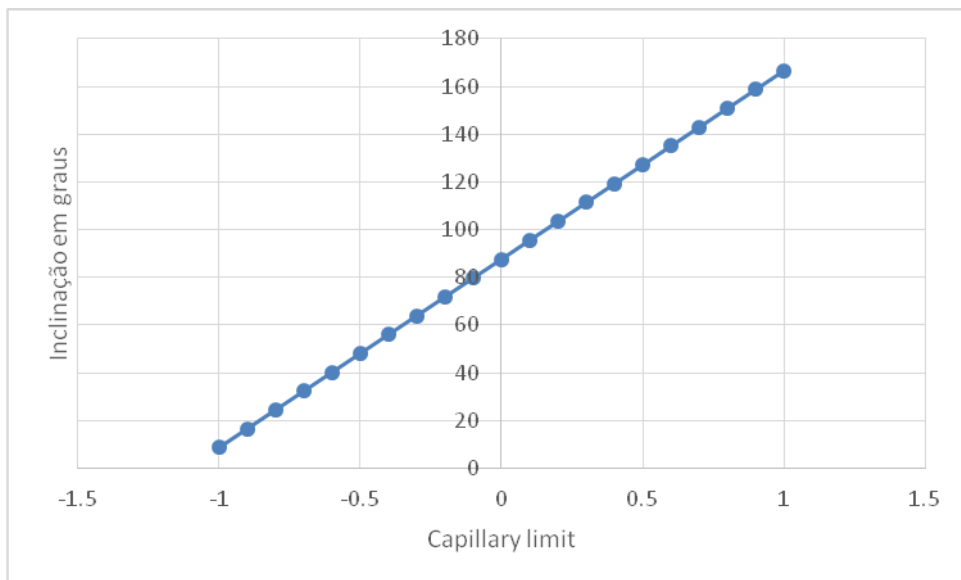
Fonte: Produção do Autor.

Figura 2.5.3 – Ilustra a influência para o fluido Acetona 40°C.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 2.5.4 – Ilustra a influência para o fluido Água 40°C.

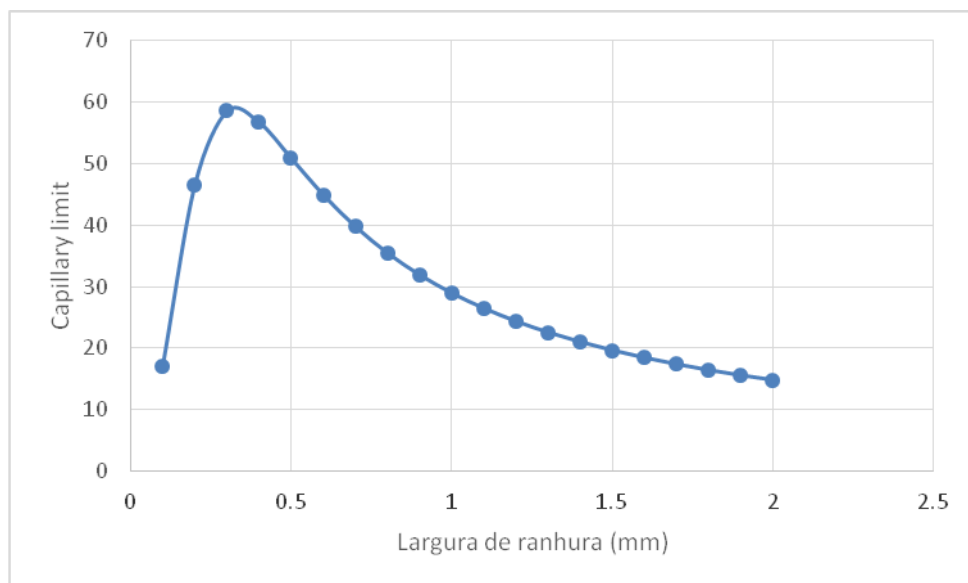


Fonte: Produção do Autor.

2.5.3 Resultados de análise de influência de largura de ranhura para limite capilar

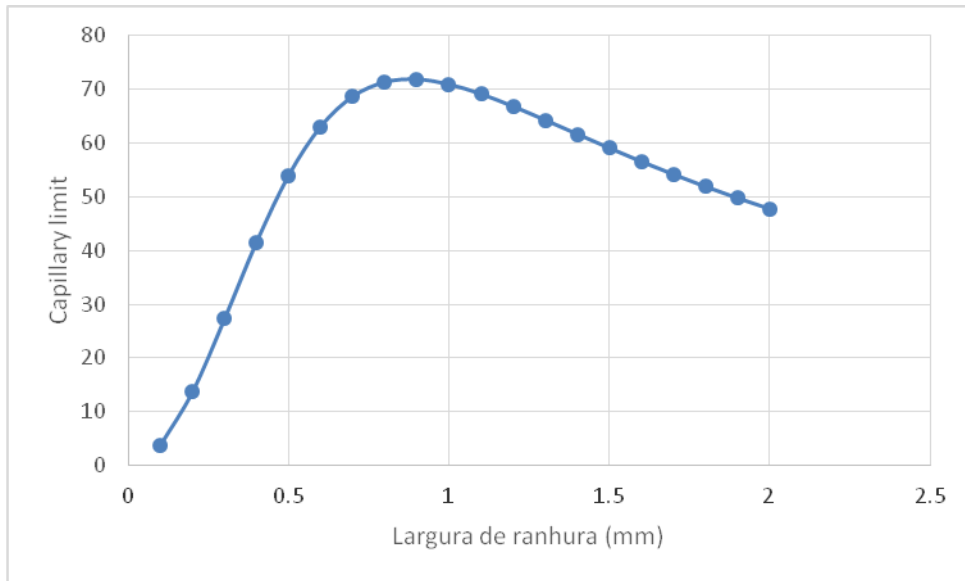
A seguir os gráficos que serão apresentados representam a variação largura de ranhura e sua influência para o limite capilar. Novamente os gráficos serão apresentados para três fluidos diferentes. Os gráficos foram gerados em inclinação neutra.

Figura 2.5.5 – Ilustra a influência para o fluido Água 20°C.



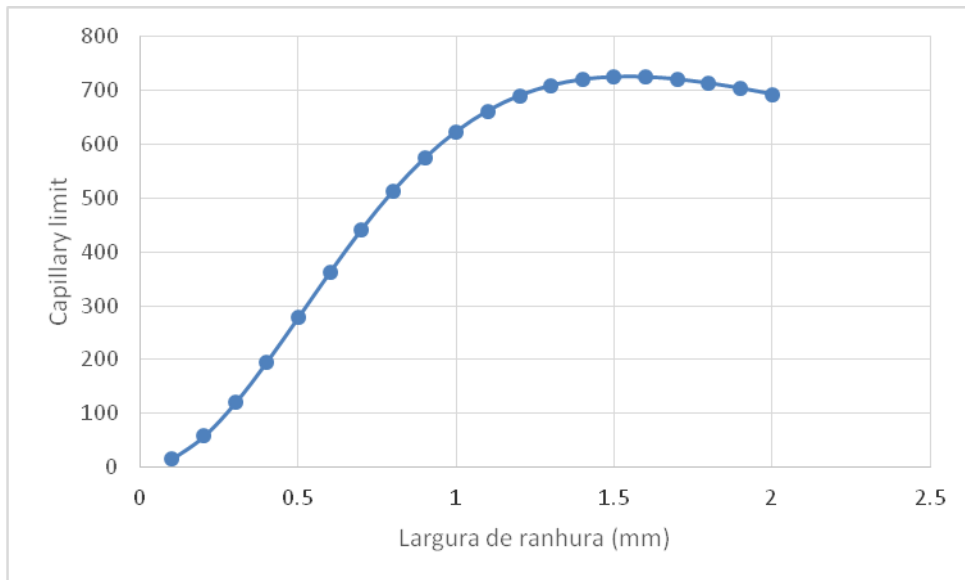
Fonte: Produção do Autor.

Figura 2.5.6 – Ilustra a influência para o fluido Acetona 20°C.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 2.5.7 – Ilustra a influência para o fluido Amônia 20°C.



Fonte: Produção do Autor.

Ao analisar as figuras 2.5.4 a 2.4.6, nota-se um aumento no desempenho do *capillary limit* à medida que a largura da ranhura aumenta. No entanto, esse

ganho apresenta um limite, pois após um aumento máximo da largura, o desempenho do *capillary limit* começa a declinar.

3 CONCLUSÃO

De forma geral, os resultados dos testes confirmaram as hipóteses discutidas na literatura, como a influência do sistema de refrigeração e da potência fornecida ao tubo de calor. Foi constatado que em cada tipo de situação o tubo de calor tem uma inclinação inicial diferente para chegar no *dry out*, essa inclinação pode-se chegar antecipadamente com uso de potências altas, ou afastar-se com uso de potência baixas. Portanto, os resultados obtidos foram satisfatórios nesse sentido. Além de permitir a comparação da eficiência do tubo, em diferentes inclinações e diferentes tipos de refrigeração.

Além disso, o projeto proporcionou o desenvolvimento de habilidades importantes, como a manipulação cuidadosa em laboratório e técnicas de manipulação de dados. Essas habilidades, embora tenham sido aplicadas no contexto específico deste projeto, são amplamente relevantes em várias áreas do conhecimento.

Também foi publicado dois relatórios dentro da divisão, sendo eles: "ESTUDO EXPERIMENTAL DO TUBO DE CALOR EM DIFERENTES ANGULOS DE INCLINAÇÃO: AVALIAÇÃO DO FENÔMENO DE DRY OUT". O código de referência para esse relatório é: DIMEC-TE-TRP-0014. E outro relatório: "RELATÓRIO DE TESTE DE VIDA DO TUBO DE CALOR HP1 COM ACETONA REALIZADO EM 2022". O código de referência desse relatório é: DIMEC-TE-TRP-0012vOO.

Dessa forma, concluímos que este projeto contribuiu para a compreensão do funcionamento do tubo de calor, abordando lacunas existentes na literatura e fornecendo uma base sólida para pesquisas futuras nessa área. Além disso, o projeto promoveu o aprimoramento de habilidades técnicas essenciais, que podem ser aplicadas em diferentes contextos. Recomenda-se, portanto, a continuidade das investigações sobre o fenômeno do *dry out* e a exploração de outras aplicações e possibilidades relacionadas aos tubos de calor. Recomenda-se realizar novamente esses testes com inclinação dinâmica e utilizando um sistema de refrigeração mais eficiente, para verificar se o *dry out* se alonga para

uma inclinação maior, pois testes com inclinação dinâmica tem mais aplicações no cotidiano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

1. CAO, Y., FAGHRI, A. Analytical solutions of flow and heat transfer in a porous structure with partial heating and evaporation on the Upper surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 37, 10, 1525 – 1533, 1994.
2. Chi, S.W. *Heat Pipe Theory and Practice, A Sourcebook*, Hemisphere Publishing Corporation, 1976, pp. 33-95.
3. Cristiano Enke, Jorge Bertoldo Júnior, Valeri Vlassov. Transient response of na axially-grooved, aluminum-ammonia heat pipe with the presence of non-condensable gas. *Applied Thermal Engineering*, 183 (2021) 116136.
4. Faghri, A. *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor & Francis, 1995; 2nd edition 2016.
5. Fleischman G.L., Chiang T.C. and Ruff R.D. Oxygen Heat pipe 0-G Performance Evaluation Base don 1-G Tests. AIAA paper 91-1358, AIAA 26th Thermophysics Conference, Honolulu, Hawaii, June 24-26, 1991.
6. FLOREZ MERA, Juan Pablo et al. Análise da transferência de calor em meios de porosidade variável para tubos de calor. 2011.
7. GILMORE, D. G. *Satellite Thermal Control Handbook*, California, 1994.
8. Jorge Bertoldo Junior, Valeri V. Vlassov, Gino Genaro, Ulisses Tadeu Vieira Guedes. Dynamic Test Method to determine the Capillary Limit of Axially Grooved Heat Pipes. *Experimental Thermal and Fluid Science*. ISSN 0894-1777. Volume 60, January 2015, Pages 290–298.
9. KRAMBECK, Larissa et al. Estudo experimental do desempenho térmico de estruturas capilares de pó de cobre sinterizado em tubos de calor. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

10. MARCUS, B. D.; EDWARDS, D. K.; ANDERSON, W. T.; NASA. Ames Research Center Variable conductance heat pipe technology – Redondo Beach, CA: TRW Systems, 1973. 133 p., 945480 cm. (NASA CR-114686) (TRW Research Report), 4).
11. MODE, RISE. AIR COOLER GAMER Z3 - RM-ACZ-03-FB. Rise Mode. Disponível em: <<https://www.lojarisemode.com.br/produto/air-cooler-gamer-z3-rm-acz-03-fb>>. Acesso em: 4 ago. 2023.
12. Nadjara dos Santos, Valeri Vlassov, Jorge Bertoldo Junior and Olga Kchoukina. Performance Divergences of Axially Grooved Heat Pipes with Narrow Channels during Inclination Ground Testing. Joint 19th IHPC and 13th IHPS, Pisa, Italy, June 10-14, 2018.
13. NISHIDA, Felipe Baptista et al. Desenvolvimento de tubos de calor com microranuras fabricadas por eletroerosão a fio. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
14. Valeri Vlassov, Jorge Bertoldo Junior and Nadjara dos Santos. A comparative study of performance of heat pipes with rectangular and omega-type grooves. Joint 19th IHPC and 13th IHPS, Pisa, Italy, June 10-14, 2018.
15. Vlassov V., Henghui M., Costa R.L. 1, Santos N., Bertoldo Junior J. Experience on CBERS 04A Satellite Thermal Control Heat Pipes. Joint 20th IHPC and 14th IHPS, Gelendzhik, Russia, September, 07-10, 2021.
16. Vlassov V., Henghui M., Costa R.L. 1, Santos N., Bertoldo Junior J. Experience on CBERS 04A Satellite Thermal Control Heat Pipes. Joint 20th IHPC and 14th IHPS, Gelendzhik, Russia, September, 07-10, 2021.
17. VLASSOV, V. V. Transient Model of a Grooved Heat Pipe Embedded in the Honeycomb Structural Panel, Proceedings of 35th International Conference on Environmental Systems (ICES), Rome, Italy, 2005.
18. VLASSOV, V. V., Analysis of heat spreading performance of acetone – filled heat pipe at low temperatures for using in satellite honeycomb

panels” Journal of Aerospace Engineering, Sciences and Applications, 1,1
– 17, 2008.

19. Yasuko Shibano¹ and Hiroyuki Ogawa¹. Thermal Behavior of Axial Grooved Heat Pipe under Gravity: Dependence of Groove Shape and Orientation. In: Proc. of 45th International Conference on Environmental Systems, ICES-2015-126, 12-16 July 2015, Bellevue, Washington, (2015).