



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 por Dr.
Valeri Vlassov e Coorientador Dr. Rafael
Lopes Costa.

URL do documento original:
<<http://urlib.net/xx/yy>>

INPE
São José dos Campos
2024

FOLHA DE ROSTO

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa PIBIC/PIBITI do INPE e a seus gerentes pela oportunidade de adquirir uma nova experiência e conhecimento específico em uma instituição de excelência como o INPE. Agradeço especialmente ao meu orientador, Dr. Valeri Vlassov, e ao coorientador, Dr. Rafael Lopes Costa, pelo suporte contínuo e orientação durante todo o meu desenvolvimento neste programa.

Não poderia deixar de reconhecer o trabalho fundamental dos técnicos que contribuíram para o meu aprendizado. Um agradecimento especial ao Eduardo e ao Pivato, cuja assistência técnica e dedicação foram essenciais para o sucesso das minhas atividades.

RESUMO

A bolsa no Programa de Iniciação Científica e Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBIC/PIBITI) englobou as atividades alinhadas aos projetos "Tubos de Calor e Experimento TUCA" e "Calculadora Térmica", ambos dentro do portfólio de projetos oficiais do INPE e desenvolvidos na DIMEC/GCGE. Inicialmente, uma revisão bibliográfica sobre tubos de calor foi realizada, com foco na formação de gases não condensáveis, sua origem e impactos na eficiência. Em seguida, analisou-se a telemetria de voo do experimento tecnológico TUCA, uma iniciativa nacional no desenvolvimento de tubos de calor atualmente a bordo do satélite Amazonia 1. O objetivo principal desta atividade foi verificar a formação de gases não condensáveis devido à exposição à radiação cósmica, durante o período em órbita de 2021 a 2024. Para processar a telemetria, desenvolveu-se uma planilha em MS Excel com macros e códigos em VBA, permitindo a remoção de dados duplicados e o tratamento adequado dos dados, considerando que a leitura de telemetria é limitada a 8 bits de discretização, resultando em saltos artificiais nos valores de temperatura. Esses saltos de aproximadamente 0,4 °C foram suavizados utilizando métodos numéricos de aproximação dinâmica de 4 pontos. Após o desenvolvimento da ferramenta, trataram-se os dados através de dois métodos. O primeiro, em regime permanente, consistiu na plotagem de temperatura versus distância na fase final de aquecimento, quando o tubo está em regime permanente, este método é bastante consolidado na literatura. O segundo método é uma inovação, que utiliza regime transiente e analisou as taxas de mudança de temperatura no início das fases de aquecimento e resfriamento (*startup* e *shutdown*) para verificar distorções ou aumento no atraso do tempo de resposta entre o evaporador e o condensador. Concluiu-se que não houve formação significativa de gases não condensáveis ao longo desses 3 anos. Além disso, montou-se a réplica do TUCA no Laboratório de Controle Térmico da DIMEC/CGCE, denominado RTUCA, para comparar a eficiência do tubo de calor em órbita (0-G) e laboratório (1-G). Foram conduzidos vários testes em regime transiente no RTUCA em condições semelhantes aos de TUCA, analisaram-se as taxas de mudança de temperatura, atrasos na resposta entre condensador e evaporador.

Também verificou-se como a gravidade afeta o desempenho do RTUCA, o qual apresentou eficiência reduzida comparado TUCA em órbita, uma vez que a gravidade causa a acumulação do fluido de trabalho (acetona) na região inferior do tubo, deixando as ranhuras superiores secas. Este fenômeno é conhecido como efeito piscina e *dry-out* parcial. Os limites operacionais do TUCA e do RTUCA foram calculados com ferramenta MS Excel “Calculadora térmica / Tubos de Calor”, desenvolvida na primeira etapa da bolsa.

Palavras-chave: tubos de calor, gases não condensáveis, limites operacionais, estudos experimentais, telemetrias de temperatura.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 - Funcionamento do tubo de calor.	4
Figura 2 - Tubos de calor presente nos satélites da família CBERS.....	6
Figura 3 - Ilustra o satélite CBERS em orbita.....	7
Figura 4 - As linhas em azul escuro, ilustram o esquema de tubos de calores presentes no satélite CBERS.	7
Figura 5 – Perfil de temperatura de um tubo de calor com GNC.	9
Figura 6 – Taxa de aquecimento no condensador, em tubo com GNC.	10
Figura 7 – Ilustração segundo método análise em regime transiente.	11
Figura 8 – Fenômeno escada devido digitalização.	16
Figura 9 – Ilustra a quantidade de dados duplicados.....	17
Figura 10 – Posicionamentos dos termistores no experimento TUCA e RTUCA.....	18
Figura 11 – Após o tratamento dos macros desenvolvidos.....	18
Figura 12 – Experimento TUCA montando no AMZ-1, antes da instalação do MLI.	21
Figura 13 - Conectores DB-09 e DB-25 montados no RTUCA.	23
Figura 14 – RTUCA momento antes de ser montado na mesa de inclinação.	24
Figura 15 – Vista lateral do RTUCA.	24
Figura 16 – Vista superior do RTUCA.....	25
Figura 17 – Perfil em regime permanente durante os 3 anos de missões do TUCA.	27
Figura 18 – Resultados regime permanente do experimento RTUCA.	30
Figura 19 – Resultado esperado em um tubo de calor sem GNC.....	31
Figura 20 – Detalhamento resultados em regime permanente do RTUCA com GNC.	32
Figura 21 – Taxas na fase de aquecimento.	33
Figura 22 – Taxas na fase de resfriamento.....	33
Figura 23 – Comparação entre os atrasos 2021 x 2024.	35

Figura 24 – Comportamento característico do condensador em tubo de calor com GNC.....	38
Figura 25 – Comportamento geral das taxas RTUCA.....	39
Figura 26 – Comportamento início da região do condensador do RTUCA. .	40
Figura 27 – Comparativo taxa da região evaporador, zona difusa e condensador do RTUCA.	41
Figura 28 – Perfil em Regime Permanente TUCA x RTUCA.	42
Figura 29 – Comparativo TUCA (1G) x TUCA x RTUCA.	43
Figura 30 – Comparativo entre as taxas no TUCA x RTUCA.....	44
Figura 31 – QrCode para acesso das planilhas.	51

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1 – Ilustra procedimento adotado para cálculo das taxas.	20
Tabela 2 - Características físicas do tubo de calor.	25
Tabela 3 – Limites operacionais do TUCA e RTUCA.....	28
Tabela 4 – Resultados gerais obtidos e análise estatístico.....	36

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AMZ-1	Satélite Amazônia-1
CGCE	Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espacial
CSV	<i>Comma-separated values</i>
DAS	Sistema de Aquisição de Dados
DIMEC	Divisão de Mecânica Espacial
G	Gravidade
GNC	Gás Não Condensável
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MLI	Isolação Multi-Camada
NTC	Negative thermal coefficient
PIBIC	Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica
PIBITI	Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação
RTUCA	Réplica do Tubo de Calor Amazônia-1 (versão laboratorial)
TBT	Teste em Vácuo Térmico
TH	Termistor
TM	Telemetria
TUCA	Tubo de Calor Amazônia-1

LISTA DE SÍMBOLOS

SUMÁRIO

	Pág.
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 Revisão bibliográfica.....	3
2.1 Introdução a tubos de calor	3
2.2 Princípio de funcionamento	4
2.3 A importância dos tubos de calor em aplicações espaciais.....	5
2.4 Geração de gases não condensáveis	8
2.4.1 Método de avaliação de regime permanente	8
2.4.2 Método de avaliação de regime transiente.....	9
2.5 Pesquisas recentes do INPE na área de tubos de calor	12
3 metodologia e materiais utilizados.....	15
3.1 Metodologia de tratamento de dados no TUCA	15
3.2 Metodologia de análise no TUCA.....	19
3.3 Metodologia de análise no RTUCA	19
3.4 Materiais e instrumentação do TUCA.....	20
3.5 Materiais e instrumentação do RTUCA	21
3.6 Características físicas do tubo de calor e incertezas dos experimentos	25
4 RESULTADOS	27
4.1 Resultados de vôo em regime permanente do TUCA ao longo da missão AMZ-1.....	27
4.2 Resultado de simulação de desempenho e limites operacionais ...	28
4.3 Resultados experimentais de regime permanente do RTUCA	29
4.4 Resultados de análise de taxas e <i>delays</i> em regime transiente do TUCA a partir última telemetria de setembro 2024.....	32

4.5	Resultados comparativos de taxas e <i>delays</i> do TUCA ao longo da missão AMZ-1 2021 à 2024	34
4.6	Resultados de regime transiente do RTUCA.....	37
4.7	Comparação de resultados entre TUCA e RTUCA	41
4.7.1	Comparação em Regime Permanente	41
4.7.2	Comparação em Regime Transiente.....	43
5	Conclusão e sugestão de trabalhos futuros.....	45
6	referencias bibliograficas	46
7	APÊNDICE	49
7.1	Ferramenta Excel para plotagem gráfica perfil temperatura do TUCA 49	
7.2	Ferramenta MS Excel para tratamento de dados do TUCA	50

1 INTRODUÇÃO

Este relatório abordará de forma técnica os objetivos e a relevância deste estudo sobre tubos de calor, com foco nas atividades desenvolvidas no âmbito do Programa de Iniciação Científica e Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBIC/PIBITI). O estudo está alinhado aos projetos "Tubos de Calor e Experimento TUCA" e "Calculadora Térmica", ambos parte do portfólio oficial do INPE e desenvolvidos na DIMEC/GCGE.

Inicialmente, uma revisão bibliográfica foi conduzida para aprofundar o entendimento sobre a formação de gases não condensáveis, sua origem e seus impactos na eficiência dos tubos de calor. Em seguida, analisou-se a telemetria de voo do experimento tecnológico TUCA, a bordo do satélite Amazônia-1, para verificar a possível formação de gases não condensáveis durante a exposição à radiação cósmica, no período em órbita de 2021 a 2024. Para processar essa telemetria, foi desenvolvida uma planilha em MS Excel com macros e códigos em VBA, permitindo a remoção de dados duplicados e o tratamento adequado dos dados de temperatura, que possuem discretização limitada a 8 bits. Os saltos artificiais nos valores de temperatura, de aproximadamente 0,4 °C, foram suavizados utilizando métodos numéricos de aproximação dinâmica de 4 pontos.

Os dados foram tratados por dois métodos: o primeiro, em regime permanente, plotou a temperatura versus distância na fase final de aquecimento, enquanto o segundo, uma inovação no estudo, utilizou regime transiente para analisar as taxas de mudança de temperatura no início das fases de aquecimento e resfriamento (startup e shutdown). Esses métodos visaram verificar distorções ou aumentos no atraso do tempo de resposta entre o evaporador e o condensador.

Além disso, foi montada a réplica do TUCA no Laboratório de Controle Térmico da DIMEC/GCGE, denominada RTUCA, para comparar a eficiência do tubo de calor em condições de gravidade zero (0-G) e de gravidade terrestre (1-G). Testes em regime transiente foram conduzidos no RTUCA em condições semelhantes às do TUCA, analisando-se as taxas de mudança de temperatura e os atrasos na resposta entre condensador e evaporador. Os limites

operacionais do TUCA e do RTUCA foram calculados utilizando a ferramenta Excel "Calculadora Térmica / Tubos de Calor", desenvolvida na primeira etapa da bolsa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução a tubos de calor

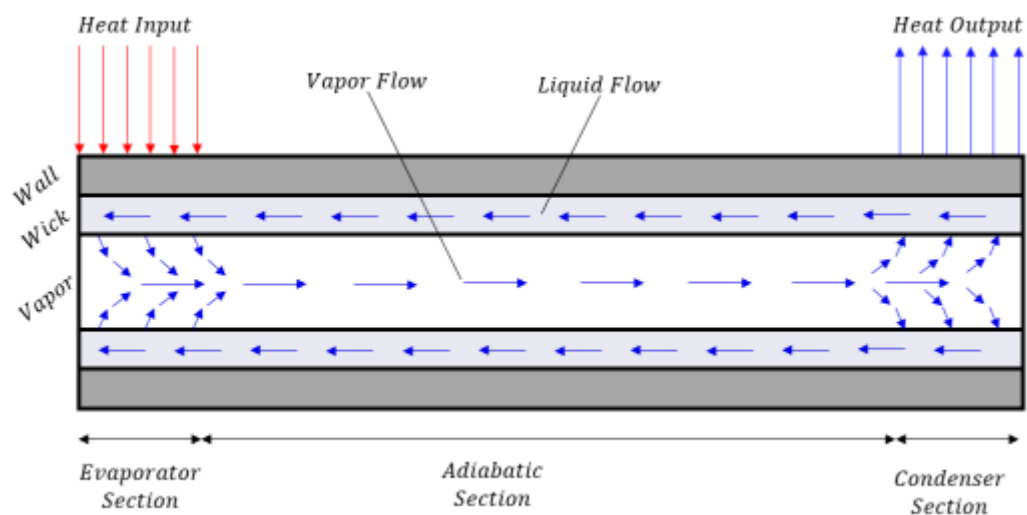
Os tubos de calor são dispositivos passivos altamente eficientes para transferência de calor, amplamente usados em setores industriais e espaciais. Sua eficiência se destaca especialmente em situações que exigem a transferência de grandes quantidades de calor para certa distância de forma eficaz e com um design compacto e funcionamento passivo, sem necessidade de consumo de energia elétrica (JUNIOR, 2015). A operação de um tubo de calor baseia-se em três mecanismos fundamentais: condução, convecção e evaporação/condensação. Estruturalmente, o tubo de calor consiste em um invólucro hermeticamente selado, usualmente soldado, contendo um fluido de trabalho em equilíbrio entre as fases líquida e vapor. Este dispositivo é normalmente dividido em três seções principais: evaporador, condensador e zona adiabática (não obrigatória). No evaporador, o fluido de trabalho absorve calor da fonte quente, evaporando-se e gerando uma diferença de pressão. O vapor resultante desloca-se para o condensador, onde ocorre a liberação de calor por meio da condensação do vapor. O calor liberado passa para ambiente através de parede do tubo pela convecção ou radiação. O fluido condensado então retorna ao evaporador, fechando o ciclo de transferência de calor, seja por capilaridade ou por ação gravitacional (FAGHRI, 1994).

Os materiais utilizados no invólucro cilíndrico do tubo de calor variam conforme a aplicação. Na indústria eletrônica, o cobre é frequentemente empregado, enquanto no setor espacial, o alumínio é o material de escolha. A seleção do material influencia a escolha do fluido de trabalho, com os mais comuns sendo água, acetona e amônia, os quais também determinam a faixa de temperatura operacional dos tubos de calor. Estudos na literatura, como o de REAY e JOHNSON (1976), destacam que diferentes combinações de materiais e fluidos resultam em variações na vida útil dos tubos de calor, incluindo análises específicas envolvendo o uso de acetona como fluido de trabalho.

2.2 Princípio de funcionamento

Os tubos de calor funcionam com base no princípio de transferência de calor através de mudanças de fase do fluido de trabalho contido em seu interior. Eles são compostos por três componentes principais: o evaporador, a região adiabática e o condensador. No processo, o fluido de trabalho recebe calor no evaporador, onde se transforma em vapor, e se move para o condensador, onde o vapor se condensa, liberando o calor para o ambiente externo. O fluido condensado retorna ao evaporador por capilaridade ou por ação gravitacional, reiniciando o ciclo (FAGHRI, 1994). Na Figura 1, ilustra o funcionamento do tubo de calor.

Figura 1 - Funcionamento do tubo de calor.



Fonte: (ENKE,2020).

2.3 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.

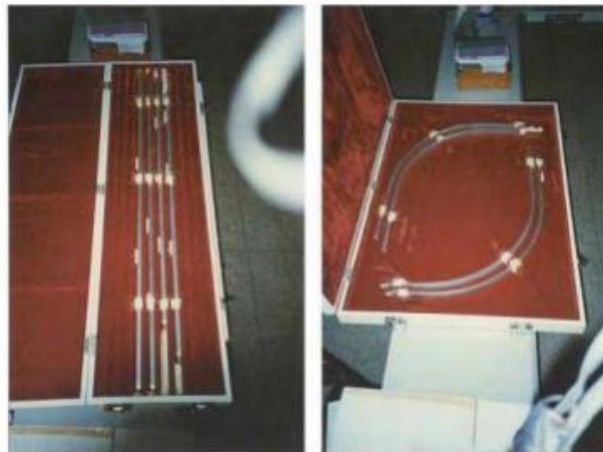
De maneira geral, os equipamentos eletrônicos dos satélites tendem a gerar uma quantidade excessiva de calor, por isso existe a necessidade de dispersão de calor, já que no espaço não há troca de calor por convecção natural ou forçada. Os tubos de calor permitem a troca de calor de modo passivo, sem 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:

- a) **CBERS 1 e 2:** Quatro tubos de calor inseridos em dois painéis, totalizando oito tubos de calor presente.

- b) **CBERS 2B:** Quatro tubos de calor inseridos em dois painéis e mais quatro na câmera de captura de imagens, totalizando doze tubos de calor presente.
- c) **CBERS 3 e 4:** Vinte e dois tubos de calor, todos destinados à estabilização térmica de seis painéis.

A Figura 2 ilustra tubos de calores utilizados nos satélites da família CBERS.

Figura 2 - Tubos de calor presente nos satélites da família CBERS.



Fonte: (SANTOS,2009).

A Figura 3 é uma ilustração do satélite CBERS.

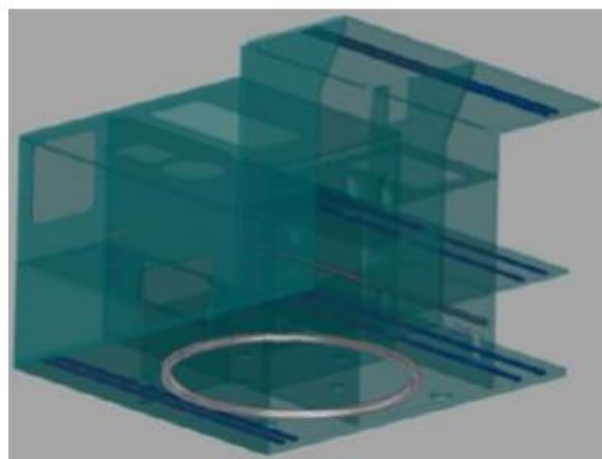
Figura 3 - Ilustra o satélite CBERS em órbita.



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

A Figura 4 mostra posição de tubos de calor embutidos na estrutura de painéis *honeycomb* do satélite CBERS 4A.

Figura 4 - As linhas em azul escuro, ilustram o esquema de tubos de calores presentes no satélite CBERS.



Fonte: (Projeto CBERS/INPE).

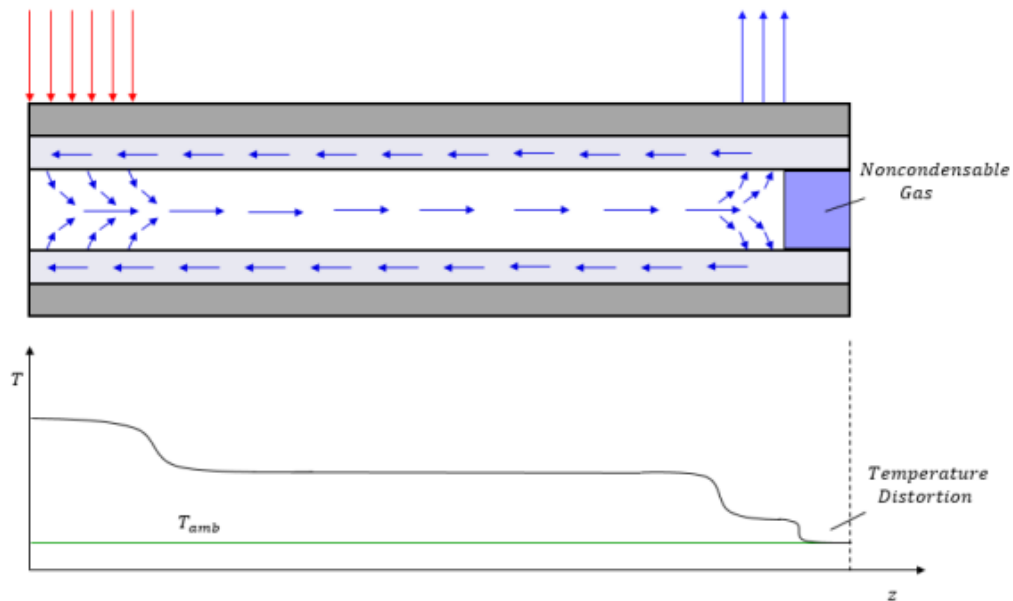
2.4 Geração de gases não condensáveis

Os tubos de calor podem enfrentar o problema dos gases não condensáveis (GNC), que afetam significativamente seu desempenho. Esses gases podem ser gerados ao longo do tempo por reações químicas lentas devido à presença de impurezas em pequenas concentrações no interior do tubo de calor e no fluido de trabalho. A formação de GNC também pode ocorrer em decorrência de vazamentos, uso de materiais inadequados, processos de fabricação deficientes ou reações químicas entre o fluido e o material do corpo do tubo de calor (MARCUS,1973).

2.4.1 Método de avaliação de regime permanente

A presença de GNC no interior do tubo de calor pode bloquear parcialmente o canal de vapor, especialmente na região de condensação, o que leva a uma redução na eficiência do sistema de transferência de calor. Este bloqueio resulta em um aumento da diferença de temperatura medida pelos sensores, e essa variação pode ser usada como um critério para a detecção de GNC. O aumento na diferença de temperatura correlaciona-se diretamente com o comprimento da zona bloqueada, contribuindo para a instabilidade do ciclo de operação e a consequente degradação da capacidade de transporte de calor do tubo de calor. Portanto, a monitoração e controle da presença de GNC são cruciais para garantir a eficiência operacional em aplicações críticas, como sistemas térmicos de satélites (JUNIOR, 2017). A Figura 5 ilustra um tubo de calor com a presença de gás não condensável, mostrando a zona bloqueada com barreira difusa entre vapor e gás, e o perfil característico de temperatura em regime permanente em um tubo com GNC.

Figura 5 – Perfil de temperatura de um tubo de calor com GNC.



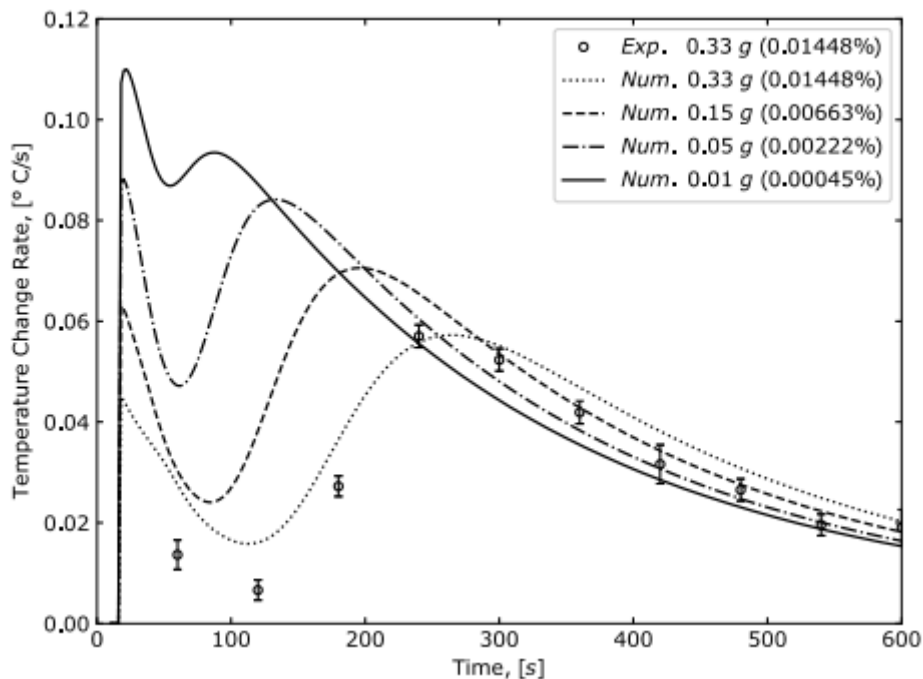
Fonte: (ENKE,2020).

2.4.2 Método de avaliação de regime transiente

Os regimes transitórios, que envolvem as fases de aquecimento e resfriamento do tubo de calor, oferecem uma oportunidade para detectar variações sutis na dinâmica térmica que podem indicar presença de GNCs. Durante o regime transiente, os GNCs podem alterar o perfil de temperatura ao longo do tubo de calor, resultando em respostas anômalas, como atrasos na transferência de calor entre o evaporador e o condensador, ou uma mudança na taxa de variação de temperatura. Essas alterações são difíceis de detectar em regime estacionário, onde o sistema já alcançou um equilíbrio térmico.

Experimentalmente, a detecção de GNC pode ser realizada através de metodologias não invasivas, com a instrumentação de *skin-heaters* e termopares, que permitem aquecer e medir as taxas de mudança de temperatura. Essas taxas são sensíveis à presença de GNC e podem ser usadas para identificar alterações no desempenho térmico do tubo de calor. Além disso é possível desenvolver modelo matemático que simula o desempenho de o tubo de calor com gás. Figura 6 mostra distorção de perfil de taxa de temperatura (C/s) no fim de condensador em primeiros momentos do aquecimento no *start-up*, quando o *heater* foi ligado, para concentrações diferentes de GNC.

Figura 6 – Taxa de aquecimento no condensador, em tubo com GNC.

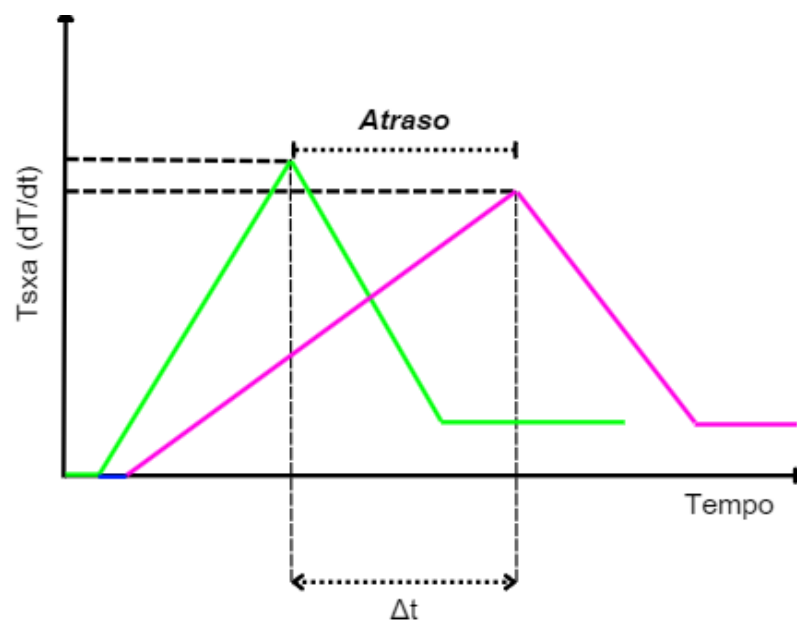


Fonte: (ENKE,2020).

Além desse método apresentado acima, existe um outro método comparativo para verificar se houve formação GNC, esse segundo método consiste em verificar se houve aumento no atraso entre a resposta do evaporador para o condensador nos momentos de *startup* ou *shut-down*.

A Figura 7 ilustra qualitativamente o comportamento do tubo de calor quando submetido a uma fonte quente. Inicialmente, a região do evaporador é a primeira a sentir o aumento de temperatura, fazendo com que o fluido presente se vaporize e se desloque em direção à região oposta, o condensador. Nesse processo, o condensador absorve o calor transferido. No entanto, o tempo de resposta desse sistema é influenciado pela presença de gases não condensáveis, que retardam a transferência térmica eficiente entre o evaporador e o condensador.

Figura 7 – Ilustração segundo método análise em regime transiente.



Fonte: Autor, (2024).

2.5 Pesquisas recentes do INPE na área de tubos de calor

Em Fleischman et al. (1991) realizaram um estudo pioneiro sobre tubos de calor criogênicos, examinando como a distribuição de fase líquida se comporta em ranhuras retangulares sob diferentes inclinações de gravidade. Este estudo foi fundamental para entender os limites capilares em condições variadas de inclinação, que são cruciais para aplicações espaciais onde o comportamento do fluido de trabalho é sensível às forças gravitacionais, mesmo que sejam mínimas em ambientes de microgravidade.

Bertoldo et al. (2015) propuseram um método inovador para a detecção de momentos críticos, como o *dry-out*, em tubos de calor. Utilizando um procedimento transitório, eles conseguiram identificar pontos críticos relacionados à falha capilar em condições desfavoráveis. O uso de uma mesa motorizada de velocidade angular controlada para monitorar esses eventos críticos foi um avanço significativo na compreensão e mitigação de falhas em tubos de calor, especialmente em aplicações onde a gravidade desempenha um papel adverso.

Vlassov et al. (2021) destacam-se por seu estudo sobre a aplicação de tubos de calor com duplos núcleos em satélites, uma tecnologia promissora para o controle térmico de sistemas espaciais. A pesquisa realizada no contexto do satélite CBERS 04A exemplifica a importância de otimizar o projeto e a fabricação desses dispositivos para garantir a eficiência térmica em missões espaciais. O artigo descreve testes realizados em diferentes etapas de desenvolvimento e fabricação, fornecendo uma base sólida para entender a aplicação de tubos de calor em missões similares, como a do satélite Amazonia 1.

Enke et al. (2021) contribuíram significativamente ao estudar o impacto dos GNCs em tubos de calor axiais ranhurados de alumínio-amônia, que são amplamente utilizados em satélites. O estudo focou na formação de GNCs devido a reações químicas fracas ou infiltração de ar durante o processo de

carga, destacando como esses gases podem deteriorar o desempenho dos tubos ao longo do tempo. A metodologia desenvolvida, que inclui a validação de modelos matemáticos por meio de experimentos, é particularmente relevante para a análise da telemetria do experimento TUCA a bordo do Amazonia 1.

Em 28 de fevereiro de 2021, foi lançado ao espaço o satélite brasileiro Amazônia-1, que desde então tem operado com sucesso em órbita, cumprindo sua função principal de observação da Terra. Além da câmera ótica, sua carga útil principal, o satélite também carrega um experimento tecnológico chamado TUCA (TUbo de CAlor). O principal objetivo deste experimento é monitorar o desempenho de um tubo de calor de alumínio-acetona durante os quatro anos de vida orbital da missão Amazônia-1. Através da telemetria das temperaturas, busca-se detectar possíveis sinais de geração de gases não condensáveis (GNC), resultantes de radiólise da acetona. Este experimento em voo faz parte da fase final de qualificação da tecnologia de tubos de calor alumínio-acetona desenvolvida pelo INPE. Caso não sejam detectados GNCs, será confirmada a eficácia total da tecnologia, liberando o uso de tubos de calor 100% nacionais para futuras missões espaciais. A utilização de acetona, em substituição à amônia, tradicionalmente empregada em tubos de calor, representa uma solução de baixa pressão, sendo mais segura e menos tóxica, abrindo novas possibilidades para o uso de materiais comuns em aplicações espaciais. Em paralelo, foi fabricada uma réplica do TUCA, chamada RTUCA, para experimentos em laboratório, onde a radiação cósmica não interfere. Esse setup permite comparar o desempenho de tubos de calor sob condições de microgravidade (0G) e gravidade terrestre (1G). O tubo instalado no RTUCA pode ser idêntico ao do TUCA, sem GNC, para uma comparação direta de desempenho, ou conter GNC (como ar introduzido durante o carregamento) para estudar as características transientes de tubos de calor com e sem a presença de gases. Atualmente, o RTUCA opera com um tubo de calor contendo GNC. A principal contribuição deste trabalho é apoiar as pesquisas conduzidas no INPE, visando a continuidade e o aperfeiçoamento de métodos de alta sensibilidade para a detecção remota de GNC em tubos de calor, por meio de medições de temperatura ao longo do comprimento do tubo. Essa metodologia é aplicável

tanto ao experimento TUCA/RTUCA quanto a tubos de calor em geral para aplicações espaciais.

3 METODOLOGIA E MATERIAS UTILIZADOS

3.1 Metodologia de tratamento de dados no TUCA

A metodologia adotada para a análise do TUCA a bordo do satélite Amazonia-1 foca no processamento e análise dos dados de telemetria (TM) para avaliar a eficiência do dispositivo em condições orbitais. Um dos principais objetivos é identificar a possível formação ou presença de Gases Não Condensáveis (GNC) no tubo de calor, causada pela exposição à radiação cósmica, que pode comprometer o desempenho térmico do sistema.

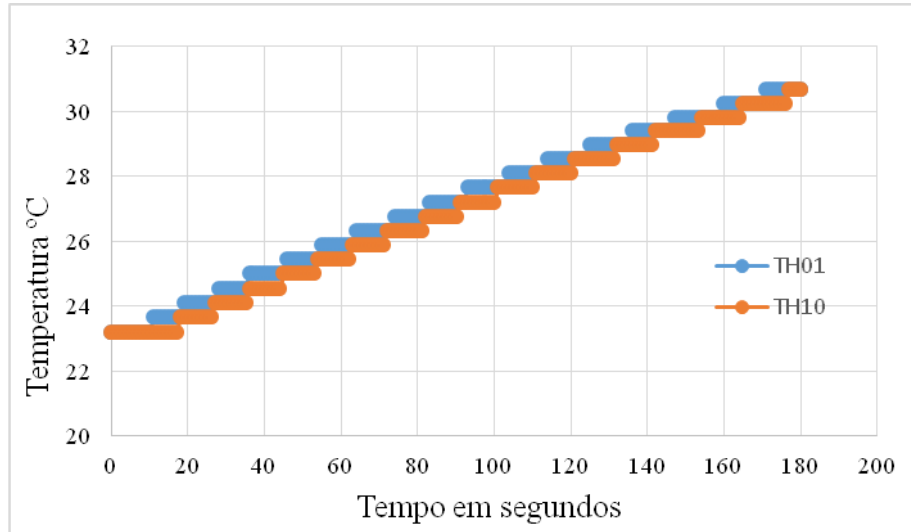
Devido à natureza digital do sistema de coleta de temperatura, que possui uma resolução limitada de 8 bits, as medições analógicas feitas pelos termistores são convertidas em 256 níveis discretos ($2^8 = 256$), resultando em uma resolução de leitura de aproximadamente $0,4^{\circ}\text{C}$. Isso significa que as temperaturas transmitidas via telemetria são discretizadas e não mais contínuas, como seriam nas medições analógicas.

O principal desafio metodológico surge na análise de transientes térmicos, que se baseia nos perfis de temperatura e nos atrasos nas taxas de variação da temperatura ($^{\circ}\text{C/s}$). Para realizar essa análise, é necessário calcular as derivadas das temperaturas medidas no TUCA. No entanto, como os valores de temperatura são discretos, as derivadas resultam em apenas duas magnitudes possíveis: zero (0) ou infinito (∞), o que dificulta a interpretação precisa das variações térmicas e a identificação de eventos transientes.

Para enfrentar este desafio, um tratamento especial das temperaturas do TUCA que chegam do satélite pela telemetria, precisou ser desenvolvido. A primeira etapa consiste em um pré-processamento rigoroso para eliminar linhas duplicatas da telemetria e refinar os dados.

A Figura 8 ilustra o fenômeno escada devido a repetição de dados duplicados.

Figura 8 – Fenômeno escada devido digitalização.



Fonte: Autor, (2024).

O processo de tratamento de dados começa com a remoção de valores de temperatura duplicados, seguido pelo cálculo das taxas de variação de temperatura utilizando o método dos mínimos quadrados com polinômios de 2º grau. Esse procedimento é fundamental para eliminar ruídos e aumentar a precisão na detecção de distorções no perfil térmico. A metodologia também leva em consideração o comportamento transiente da temperatura durante as fases de aquecimento e resfriamento, modelando-a por meio de um polinômio de 2º grau em função do tempo. Com os coeficientes do polinômio obtidos para cada instante de tempo t_i , a derivada da temperatura em relação ao tempo é calculada de forma direta, proporcionando uma estimativa mais precisa das variações térmicas.

A aproximação da temperatura:

$$T(t_i) = a_i + b_i t_i + c_i t_i^2$$

A derivada exata:

$$\left(\frac{dT(t)}{dt} \right)_{t=t_i} = b_i + 2c_i t_i$$

Com base nessa tecnologia, foi desenvolvida uma ferramenta em Excel, utilizando macros em VBA, para automatizar a importação, limpeza, visualização e análise dos dados de telemetria (TM). Essa ferramenta facilita a geração de gráficos e o cálculo das taxas de variação de temperatura, permitindo a identificação de possíveis anomalias relacionadas à presença de gases não condensáveis (GNC) e o monitoramento do atraso entre as respostas térmicas do evaporador e do condensador. A Figura 9 ilustra o fenômeno da repetição de dados: as linhas em azul representam os primeiros instantes da fase de aquecimento, a célula em rosa indica a primeira variação de temperatura detectada, enquanto os tempos destacados em rosa mostram o momento exato em que ocorreu a primeira variação de temperatura no evaporador, seguido pela alteração de temperatura no condensador.

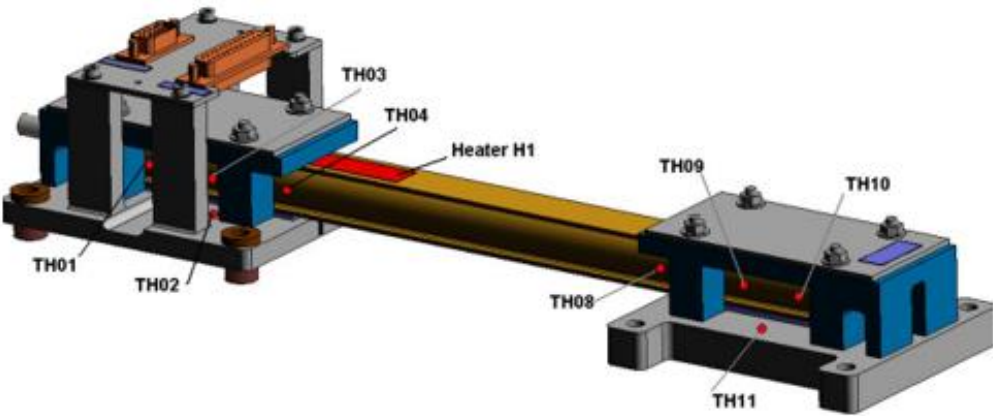
Figura 9 – Ilustra a quantidade de dados duplicados.

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
timestamp	TH01	TH03	TH04	TH05	TH06	TH07	TH08	TH09	TH10	D340	D360	Tempo Relat			
02:12.0	23.20482	#	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	22.75143	22.75143	22.75143	23.20482	#	0	0	0.00	
02:13.0	23.20482	#	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	22.75143	22.75143	22.75143	23.20482	#	1	0	1.00	
02:14.0	23.20482	#	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	22.75143	22.75143	22.75143	23.20482	#	1	0	2.00	
02:15.0	23.20482	#	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	22.75143	22.75143	22.75143	23.20482	#	1	0	3.00	
02:16.0	23.20482	#	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	22.75143	22.75143	22.75143	23.20482	#	1	0	4.00	
02:17.0	23.20482	#	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	22.75143	22.75143	23.20482	23.20482	#	1	0	5.00	
02:18.0	23.20482	#	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	#	1	0	6.00	
02:19.0	23.20482	#	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	#	1	0	7.00	
02:20.0	23.20482	#	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	#	1	0	8.00	
02:21.0	23.20482	#	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	#	1	0	9.00	
02:22.0	23.20482	#	23.65629	23.65629	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	#	1	0	10.00	
02:23.0	23.65629	#	23.65629	23.65629	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	#	1	0	11.00	
02:24.0	23.65629	#	23.65629	23.65629	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	#	1	0	12.00	
02:25.0	23.65629	#	23.65629	23.65629	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	#	1	0	13.00	
02:26.0	23.65629	#	23.65629	23.65629	23.65629	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	#	1	0	14.00	
02:27.0	23.65629	#	23.65629	23.65629	23.65629	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	#	1	0	15.00	
02:28.0	23.65629	#	23.65629	23.65629	23.65629	23.65629	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	#	1	0	16.00	
02:29.0	23.65629	#	23.65629	23.65629	23.65629	23.65629	23.20482	23.20482	23.20482	23.20482	#	1	0	17.00	
02:30.0	23.65629	#	24.10592	23.65629	23.65629	23.65629	23.65629	23.65629	23.20482	23.65629	#	1	0	18.00	
02:31.0	24.10592	#	24.10592	24.10592	23.65629	23.65629	23.65629	23.65629	23.65629	23.65629	#	1	0	19.00	
02:32.0	24.10592	#	24.10592	24.10592	23.65629	23.65629	23.65629	23.65629	23.65629	23.65629	#	1	0	20.00	
02:33.0	24.10592	#	24.10592	24.10592	23.65629	23.65629	23.65629	23.65629	23.65629	23.65629	#	1	0	21.00	

Fonte: Autor, (2024).

Os TH são do tipo NTC, com uma resistência de 10kΩ a 25°C, e suas posições estão ilustradas na Figura 10. Esses termistores são altamente sensíveis à variação de temperatura, permitindo medições precisas e confiáveis no sistema. Esses TH utilizados são qualificados para uso espacial.

Figura 10 – Posicionamentos dos termistores no experimento TUCA e RTUCA.



Fonte: Figura disponibilizada por projeto TUCA da DIMEC/CGCE/INPE, (2024).

A Figura 11, ilustra a saída a remoção de dados duplicados

Figura 11 – Após o tratamento dos macros desenvolvidos.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
TH01	Tempo	TH02	Tempo	TH03	Tempo	TH04	Tempo	TH05	Tempo	TH06	Tempo	TH07	Tempo	TH08	Tempo	TH09	Tempo	TH10	Tempo
23.65629	11	23.65629	248	23.65629	10	23.65629	10	23.65629	14	23.20482	3	23.20482	6	23.20482	6	23.20482	5	23.20482	2
24.10592	19	23.20482	249	24.10592	18	24.10592	19	24.10592	24	23.65629	16	23.65629	18	23.65629	18	23.65629	19	23.65629	18
24.5538	28	23.65629	250	24.5538	26	24.5538	28	24.5538	33	24.10592	25	24.10592	27	24.10592	27	24.10592	29	24.10592	27
25	36	23.20482	251	25	35	25	36	25	42	24.5538	33	24.5538	36	24.5538	36	24.5538	38	24.5538	36
25.44462	46	23.65629	252	25.44462	44	25.44462	46	25.44462	52	25	41	25	45	25	45	25	47	25	45
25.88772	55	23.20482	253	25.88772	53	25.88772	55	25.88772	61	25.44462	49	25.44462	53	25.44462	53	25.44462	57	25.44462	54
26.3294	64	23.65629	254	26.3294	62	26.3294	65	26.3294	71	25.88772	58	25.88772	62	25.88772	62	25.88772	67	25.88772	63
26.76972	74	23.20482	255	26.76972	72	26.76972	75	26.76972	80	26.3294	67	26.3294	71	26.3294	72	26.3294	76	26.3294	72
27.20876	83	23.65629	256	27.20876	81	27.20876	85	27.20876	90	26.76972	75	26.76972	80	26.76972	81	26.76972	86	26.76972	82
27.6466	93	23.20482	259	27.6466	91	27.6466	95	27.6466	100	27.20876	84	27.20876	89	27.20876	90	27.20876	96	27.20876	91
28.0833	104	23.65629	260	28.0833	102	28.0833	106	28.0833	110	27.6466	93	27.6466	98	27.6466	99	27.6466	106	27.6466	101
28.51893	114	24.10592	436	28.51893	112	28.51893	117	28.51893	121	28.0833	103	28.0833	108	28.0833	109	28.0833	116	28.0833	111
28.95356	125	24.5538	569	28.95356	123	28.95356	128	28.95356	132	28.51893	112	28.51893	117	28.51893	119	28.51893	127	28.51893	121
29.38727	136	24.10592	570	29.38727	134	29.38727	139	29.38727	143	28.95356	122	28.95356	127	28.95356	129	28.95356	138	28.95356	132

Fonte: Autor, (2024).

Comparações entre telemetrias de diferentes anos ajudam a identificar tendências e mudanças na performance do tubo de calor ao longo do tempo,

particularmente em relação ao acúmulo possível de GNC, que pode impactar negativamente a operação do TUCA.

3.2 Metodologia de análise no TUCA

O programa permite que o usuário, por meio de um botão na interface, importe os dados de telemetria recebidos pelo centro de controle no formato .csv. Após a importação, o *software* separa automaticamente as fases de aquecimento e resfriamento, além de realizar a limpeza dos dados duplicados, eliminando o efeito escada. Isso é feito através de uma lógica que identifica as mudanças de temperatura e registra o tempo em que essas alterações ocorrem.

Após o tratamento inicial dos dados, é realizada uma análise para determinar a taxa de aquecimento, focada nos resultados em regime transitório, como durante o *start-up* e o *shut-down*. Para isso, é utilizado um polinômio de 2º grau, do qual se derivam as taxas de aquecimento e resfriamento. Para comparar o atraso na resposta das taxas de variação de temperatura entre o evaporador e o condensador, foi estabelecido que o termistor TH03 representa a região do evaporador, enquanto o TH10 está associado à região do condensador, permitindo, assim, o cálculo preciso do atraso.

Além da análise do atraso entre as regiões, o programa também verifica possíveis distorções na taxa de aquecimento do TH10. Como mostrado anteriormente na Figura 3, a presença de gases não condensáveis (GNC) causa distorções no perfil térmico do condensador. A configuração dessas distorções varia conforme o volume de GNC presente no tubo de calor.

3.3 Metodologia de análise no RTUCA

Na análise do RTUCA, uma vez que as medidas da temperatura não passam mais pelo canal de telemetria, ficam analógicas e não mais digitais com resolução limitada, é foi adotada uma metodologia mais simples em comparação ao TUCA. Utilizou-se método direto $T-1$, T , $T+1$ para calcular a taxa de variação

de temperatura no ponto T. O cálculo foi feito subtraindo o valor em T-1 do valor em T+1 e dividindo essa diferença pelo intervalo de tempo correspondente. Na Tabela 1, fica mais claro como foi feita esta operação do cálculo das taxas.

Tabela 1 – Ilustra procedimento adotado para cálculo das taxas.

Temperatura	Tempo	Taxa
T_{i-1}	t_{i-1}	-
T_i	t_i	$\frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{t_{+1} - t_{-1}}$
T_{i+1}	t_{i+1}	

Fonte: Autor, (2024).

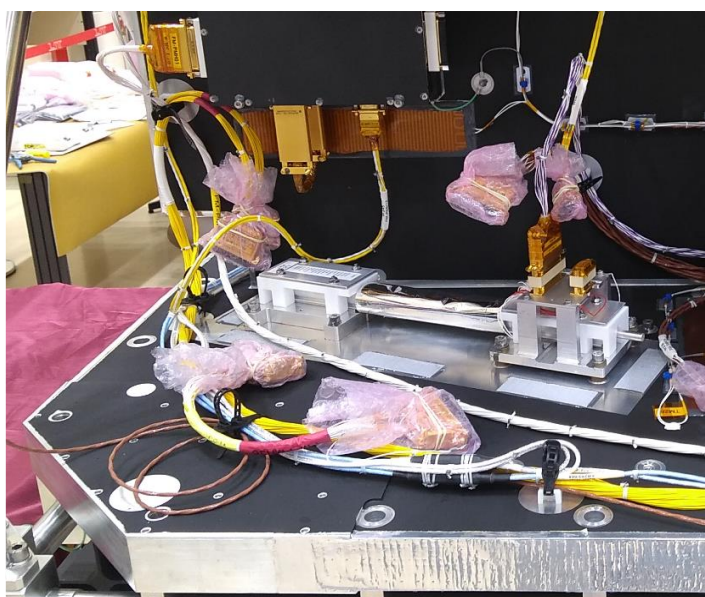
3.4 Materiais e instrumentação do TUCA

Na montagem do experimento TUCA no satélite Amazônia-1, foram utilizados materiais qualificados para uso em vácuo e aplicações espaciais, devido à sua baixa taxa de evaporação em vácuo. Os principais materiais são:

- Abraçadeiras:** Fabricadas em Teflon para fixação.
- Suportes de fixação:** Confeccionados em liga de alumínio 6063.
- Buchas e insertos isolantes térmicos:** Feitos de fibra de vidro FR4 e Torlon, garantindo isolamento térmico eficaz para proteger os componentes contra variações de temperatura.
- Parafusos:** Produzidos em aço inoxidável.
- Isolação térmica para vácuo:** Utilizou-se duas Isolação Multi-Camada (MLI), sendo uma delas responsável por isolar a região adiabática do tubo, e a outra sendo responsável de isolar todo o experimento do interior do satélite para evitar influencias de temperatura de outros dispositivos presente.

O tubo de calor do TUCA foi instrumentado com 11 termistores NTC, qualificados para uso espacial, de 10 kOhms@25°C, posicionados estrategicamente ao longo do tubo e nas placas de fixação para monitorar a temperatura. Para o aquecimento do tubo, foram utilizadas duas resistências do tipo *skin heater*, *kapton*, conectadas em série, com resistência total de 112,5 Ohms. A Figura 12 ilustra o experimento TUCA montando no AMZ-1.

Figura 12 – Experimento TUCA montando no AMZ-1, antes da instalação do MLI.



Fonte: Figura disponibilizada por projeto TUCA da DIMEC/CGCE/INPE, (2024).

3.5 Materiais e instrumentação do RTUCA

A montagem do RTUCA, uma réplica laboratorial do experimento TUCA, foi projetada para monitorar e simular o desempenho do experimento orbital em condições de laboratório. O RTUCA possui a mesma configuração do TUCA, permitindo uma comparação direta. O tubo de calor instalado no RTUCA pode ser idêntico ao do TUCA, sem gases não condensáveis (GNC), para comparar o desempenho em ambientes de microgravidade (0G) e gravidade terrestre (1G),

ou pode conter GNC, para avaliar as características transientes de tubos de calor com e sem gás em configurações iguais. Atualmente, o RTUCA está equipado com um tubo de calor contendo GNC, que corresponde ao ar introduzido durante o processo de carregamento.

O objetivo principal do RTUCA é realizar estudos comparativos, analisando o desempenho e a eficiência térmica dos tubos de calor em condições de 1G e 0G, bem como com e sem a presença de GNC, utilizando configurações idênticas. Os materiais utilizados no RTUCA foram cuidadosamente selecionados para replicar o modelo de voo (FM) da forma mais fiel possível. No entanto, dado o ambiente controlado de laboratório, foram permitidos materiais comerciais equivalentes para componentes como termistores, conectores e isolamento térmico, desde que esses ajustes não comprometessem o desempenho do tubo de calor.

A montagem envolveu várias etapas:

1. **Coleta de Materiais e Limpeza:** Os materiais foram coletados e o tubo de calor foi limpo com álcool isopropílico.
2. **Instrumentação:** Os termistores foram posicionados e colados ao tubo de calor para monitoramento de temperatura.
3. **Montagem do Tubo:** O tubo de calor foi montado junto com a base e os skin-heaters, com aplicação de pasta térmica nas regiões necessárias.
4. **Isolamento Térmico:** O tubo foi isolado termicamente para simular as condições espaciais.
5. **Conectores e Fiação:** Conectores DB-09 e DB-25 foram montados e soldados para assegurar conexões seguras com o sistema de aquisição de dados.
6. **Suporte de Inclinação:** Desenvolvido com a ajuda da Divisão de Mecânica Espacial (DIMEC) e da oficina do INPE, este suporte garante a correta inclinação para o experimento.

A configuração final do RTUCA permite a realização de testes comparativos com o TUCA em órbita, proporcionando insights valiosos sobre o comportamento

dos tubos de calor em diferentes ambientes gravitacionais e usando RTUCA com GNC como um padrão (*benchmark*) para caso se em TUCA será acumulado GNC durante a missão do AMZ-1.

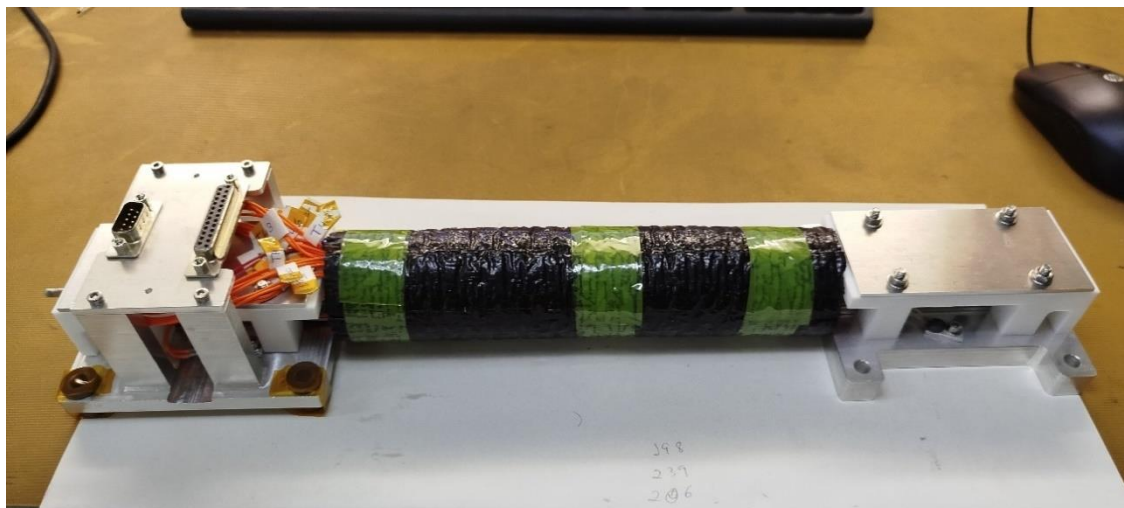
A seguir as Figuras 14 a 17 ilustram o processo de montagem do RTUCA, ilustrando os conectores, região adiabática e isolamento térmico.

Figura 13 - Conectores DB-09 e DB-25 montados no RTUCA.



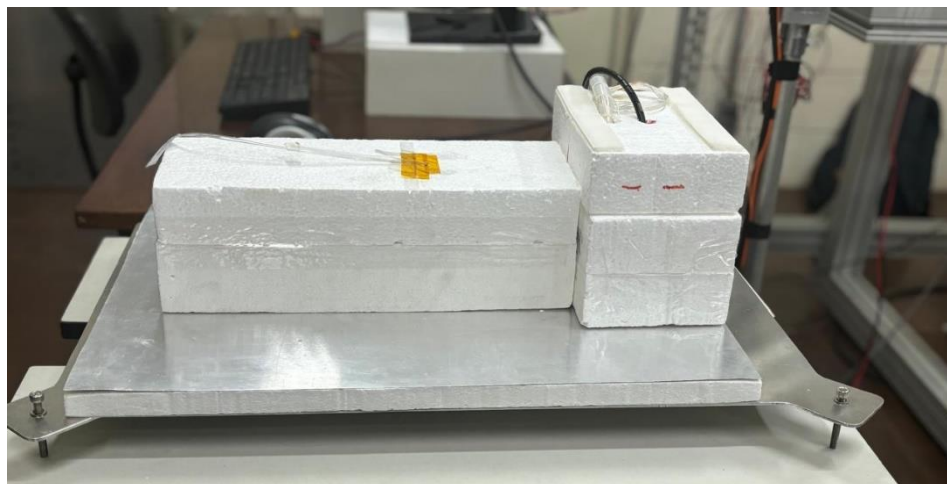
Fonte: Autor, (2024).

Figura 14 – RTUCA momento antes de ser montado na mesa de inclinação.



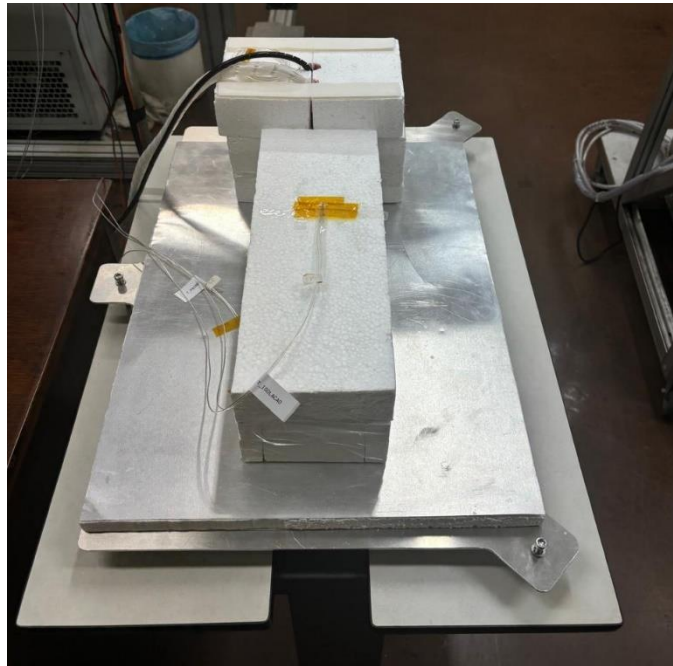
Fonte: Autor, (2024).

Figura 15 – Vista lateral do RTUCA.



Fonte: Autor, (2024).

Figura 16 – Vista superior do RTUCA.



Fonte: Autor, (2024).

3.6 Características físicas do tubo de calor e incertezas dos experimentos

A seguir na Tabela 2, será apresentado as características físicas do tubo de calor empregado no experimento TUCA e RTUCA:

Tabela 2 - Características físicas do tubo de calor.

Geometria	Dimensão	Ranhuradas retangulares	Dimensão
L_e	0.1125 (m)	w_f	0.70 (mm)
L_a	0.1165 (m)	δ_p	1.85 (mm)
L_c	0.106 (m)	w	1.14 (mm)

D_{ext}	18.4 (mm)	k_p	200 W/ (m C)
D_{int}	16.2 (mm)	δ_c	0.10 (mm)
D_v	12.5 (mm)	δ_w	1.10 (mm)
k_w	200 W/ (m C)	(N de ranhuras)	22

Fonte: Autor, 2024.

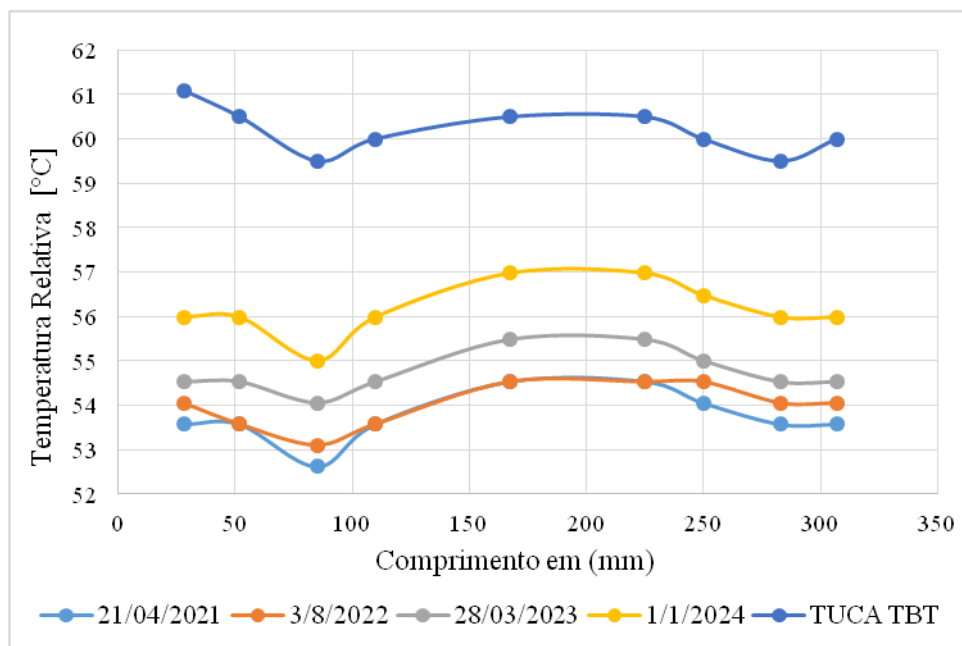
No experimento TUCA, as principais incertezas incluem aquelas inerentes ao canal de telemetria de temperaturas, que são inferiores a $\pm 0,5$ °C. Além disso, os termistores qualificados para uso espacial apresentam uma precisão elevada, com um erro de aproximadamente $\pm 0,2$ °C. No entanto, a colagem dos termistores introduz uma incerteza adicional estimada em $\pm 0,85$ °C, com base em estudos científicos, resultando em uma incerteza total de $\pm 1,55$ °C para o TUCA. Já no experimento RTUCA, foram utilizados termopares comerciais, que possuem um erro de 1 °C, somado a uma incerteza adicional de 0,1 °C na aquisição de dados e $\pm 0,85$ °C devido à colagem, resultando em uma incerteza total de $\pm 1,95$ °C. Embora as incertezas sejam relativamente elevadas, o principal objetivo do estudo é a comparação dos perfis térmicos ao longo dos anos. Dessa forma, as incertezas tendem a se anular, já que o foco está na análise comparativa dos dados, e não em medições absolutas.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados de voo em regime permanente do TUCA ao longo da missão AMZ-1

A Figura 18 a seguir apresenta uma comparação do perfil de temperatura ao longo do tubo de calor do experimento TUCA ao longo dos anos. Observa-se que, durante os 3 anos de missão do satélite AMZ-1, o perfil manteve-se bastante consistente.

Figura 17 – Perfil em regime permanente durante os 3 anos de missões do TUCA.



Fonte: Autor, 2024.

Neste gráfico, foi apresentado o perfil de temperatura adicional do TUCA, obtido durante os testes em TBT (*Thermal Balance Test*) realizados no laboratório antes do lançamento do AMZ-1, em condições de temperatura

elevada. A análise desses resultados conclui que, ao longo dos 3 anos de missão do AMZ-1, não houve distorção significativa no perfil de temperatura do TUCA em regime permanente, confirmando a ausência de geração detectável de GNC por este método. Esse resultado é extremamente positivo do ponto de vista da qualificação da tecnologia desenvolvida para tubos de calor com acetona destinados ao uso espacial. No entanto, uma análise mais detalhada, com sensibilidade aprimorada, ainda deve ser conduzida para garantir uma avaliação completa.

4.2 Resultado de simulação de desempenho e limites operacionais

A partir da calculadora térmica apresentado no relatório final do ano passado, foi calculado os limites operacionais do TUCA, foi levando em consideração suas características físicas e geométricas apresentada anteriormente na Tabela 1, e propriedades do fluido de trabalho acetona 40 graus celsius.

Tabela 3 – Limites operacionais do TUCA e RTUCA.

Limite	Resultado	Unidade	Descrição
Q_{maxc}	1094.1	W	<i>Limite capilar</i>
Q_{maxb}	930.7	W	<i>Limite de ebulição</i>
Q_{maxt}	205.3	W	<i>Limite arrasto</i>
Q_{smax}	2071.4	W	<i>Limite sônico</i>
<i>Overall Q limit</i>	205.3	W	Limite Geral

Fonte: Autor, 2024.

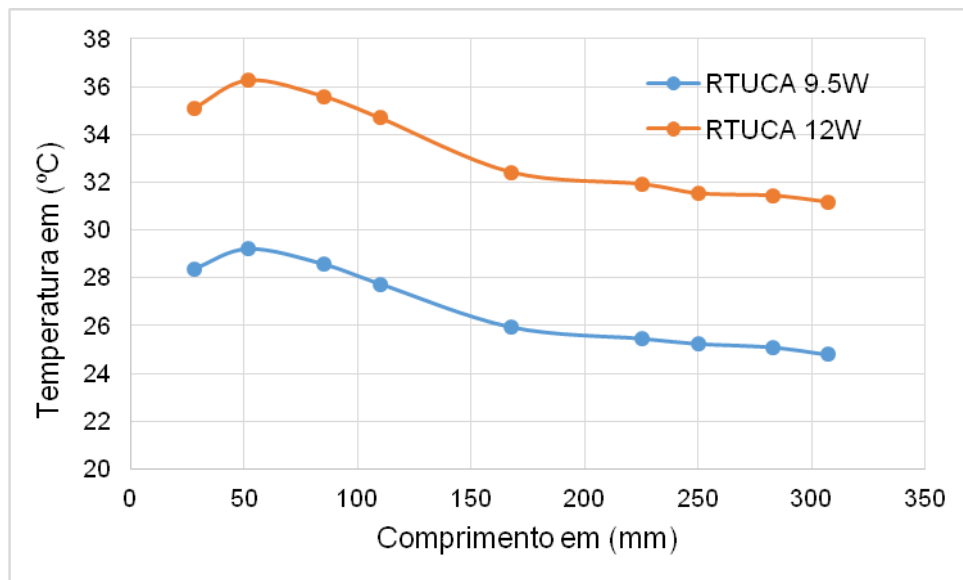
4.3 Resultados experimentais de regime permanente do RTUCA

Antes de iniciar os ensaios, discutiu-se a potência a ser fornecida ao tubo de calor. No experimento TUCA em órbita, a troca de calor ocorre predominantemente por condução, uma vez que a radiação é um meio de transferência de calor ineficaz. Em contraste, no ambiente de laboratório, o tubo de calor realiza a troca térmica tanto por condução quanto por convecção, sendo que a perda de calor por convecção é significativa.

Para simular de maneira mais precisa as condições de operação em órbita, foi conduzido um balanço térmico, calculando-se a média da temperatura absoluta do experimento ou a média em relação à temperatura ambiente. Assim, foram realizados ensaios até que a média alcançada se aproximasse do valor desejado. Com uma potência do aquecedor do RTUCA de 12W, as temperaturas médias obtidas no TUCA e no RTUCA mostraram-se praticamente idênticas, com uma variação de apenas $\pm 0,2$ graus Celsius.

No TUCA, com uma tensão de barramento do AMZ-1 de $U = 32,8$ V, fornecida pelo Centro de Controle do INPE, e uma resistência do aquecedor do TUCA de $R = 112,5$ Ohms, a potência dissipada no aquecedor do TUCA foi calculada como $P = U^2/R$, resultando em 9,56W.

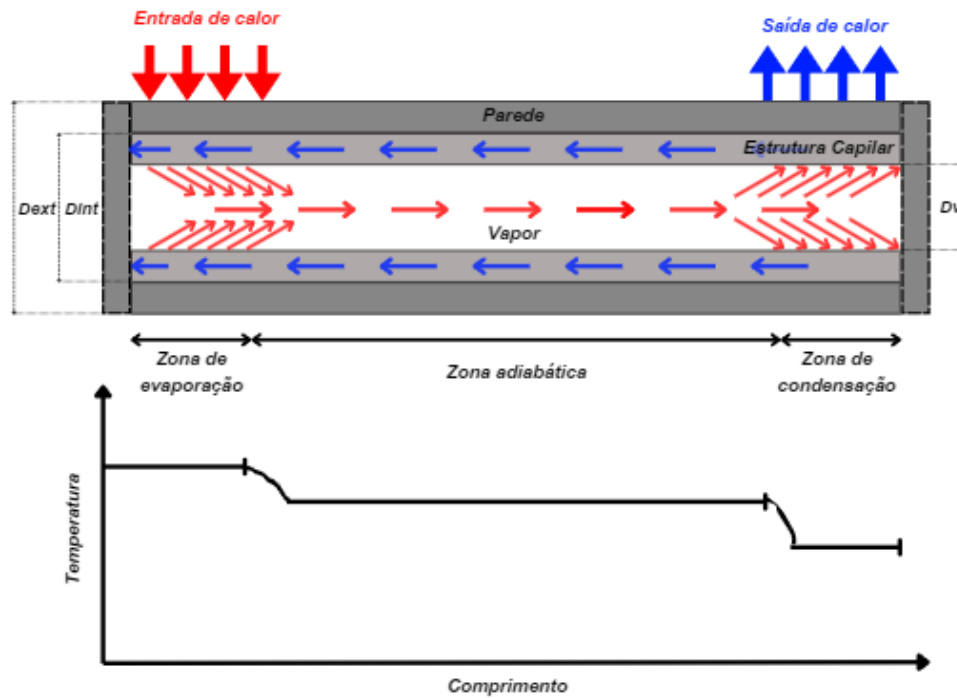
Figura 18 – Resultados regime permanente do experimento RTUCA.



Fonte: Autor, 2024.

Analisando os resultados obtidos, ilustrados na Figura 19 é possível observar que houve distorção no perfil da temperatura, na região adiabática; essa distorção ocorreu devido a grande presença de GNC no tubo de calor do RTUCA.

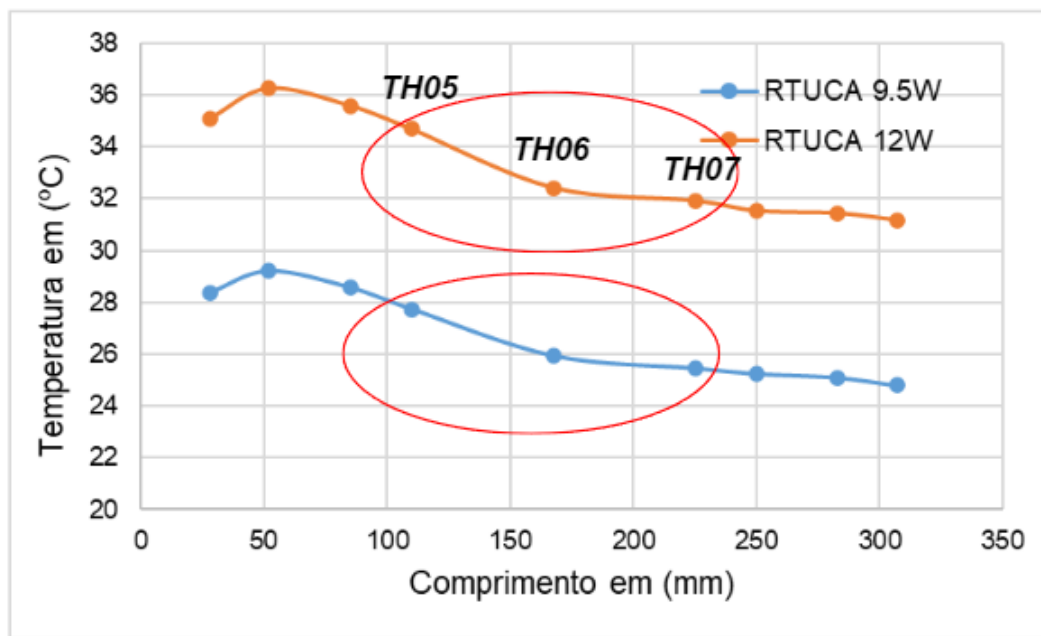
Figura 19 – Resultado esperado em um tubo de calor sem GNC



Fonte: Autor, 2024.

Analisando a Figura 20, pode-se observar que os termistores na posição TH05, TH06 e TH07 apresentaram uma curva de queda temperatura, onde deveria ser praticamente uma linha reta já que é zona adiabática. Na Figura 21 serão apresentados a esses detalhes.

Figura 20 – Detalhamento resultados em regime permanente do RTUCA com GNC.



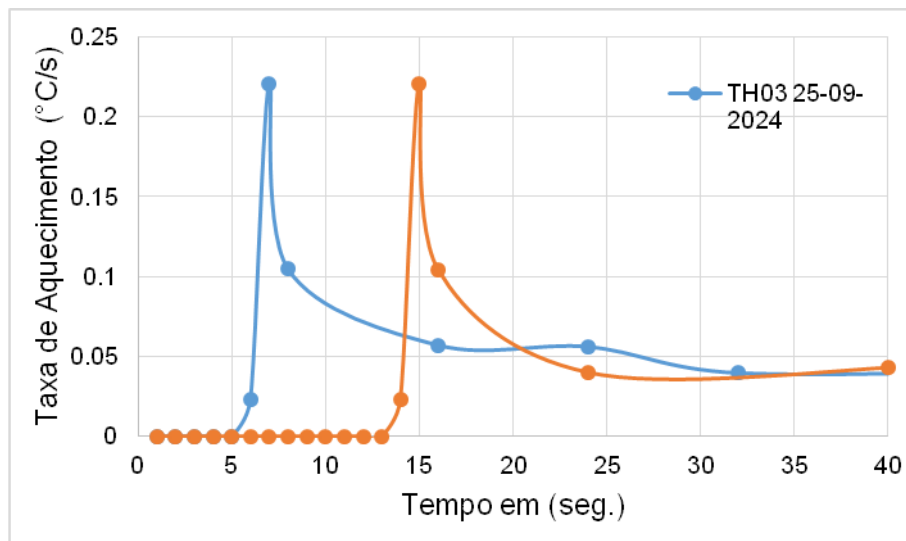
Fonte: Autor, 2024.

4.4 Resultados de análise de taxas e *delays* em regime transiente do TUCA a partir última telemetria de setembro 2024

A última telemetria analisada nesta obra foi registrada em 25 de setembro de 2024. Este capítulo será dedicado à apresentação dos resultados transitórios dessa missão.

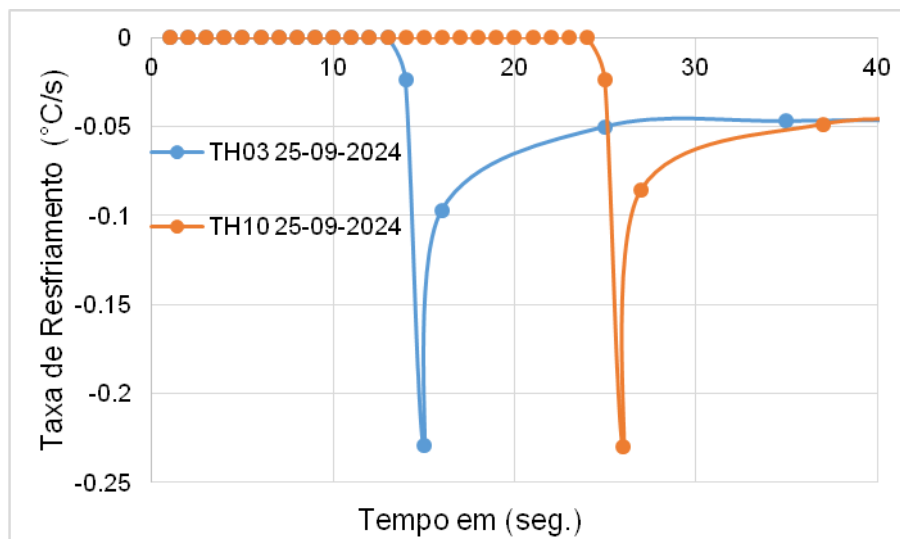
A seguir será apresentado nas Figuras 22 e 23 taxas de aquecimento e taxa de resfriamento, no início desses processos.

Figura 21 – Taxas na fase de aquecimento.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 22 – Taxas na fase de resfriamento.



Fonte: Autor, 2024.

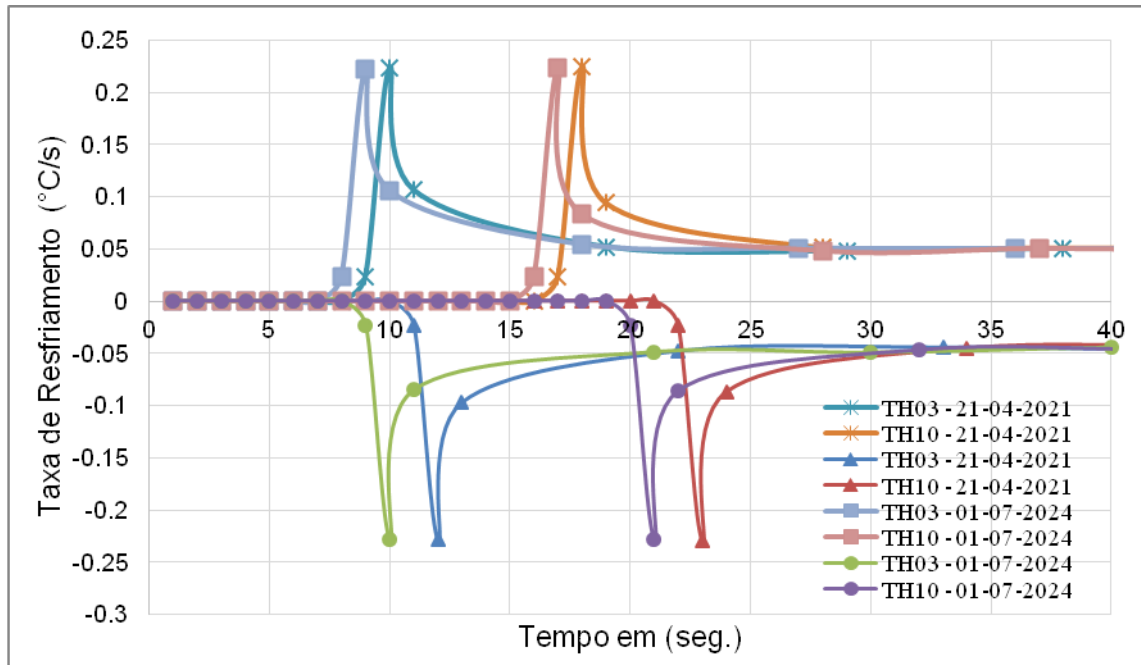
Analisando as Figuras 22 e 23, observamos um atraso de resposta entre o evaporador e o condensador. Durante a fase de aquecimento, esse atraso foi de 8 segundos, enquanto na fase de resfriamento, o atraso foi de 11 segundos. É notável que as amplitudes das taxas foram idênticas tanto no evaporador quanto no condensador, o que indica que o tubo de calor apresenta um desempenho excelente, sem sinais de presença de gás não condensável (GNC).

Esses atrasos foram monitorados ao longo dos anos da missão do AMZ-1 e estão detalhados no subcapítulo 4.5. Um possível aumento desses atrasos ao longo do tempo pode indicar a geração de gás não condensável.

4.5 Resultados comparativos de taxas e *delays* do TUCA ao longo da missão AMZ-1 2021 à 2024

A Figura 24 a seguir apresenta uma comparação dos atrasos nas fases de aquecimento e resfriamento obtidos no TUCA entre os anos de 2021 e 2024. Os dados incluem a fase de *start-up* (início do aquecimento), onde as derivadas são positivas, e a fase de *shut-down* (após o desligamento do aquecedor), caracterizada por derivadas negativas.

Figura 23 – Comparação entre os atrasos 2021 x 2024.



Fonte: Autor, 2024.

Na Figura 24, observa-se uma pequena diferença entre os tempos de resposta, no entanto entre 2021 e 2024, a telemetria passou por várias modificações, incluindo formato de hora, número de casas decimais e intervalo de leitura, com intervalos leituras de 8 segundos e 1 segundo. Durante o processamento de telemetria, foi priorizada a precisão de 1 segundo nas fases de aquecimento e resfriamento. Mesmo assim foi identificado variações no atraso entre as regiões do evaporador e condensador, sendo o menor atraso identificado 7 segundos na fase de aquecimento e maior 10 segundos, já na fase de resfriamento o menor identificado foi 9 segundos e o maior 12 segundos, essas variações ao longo dos anos são pequenas, ocorrem devido processos lentos, que o tubo de calor pode estar operando devido a diferença pequenas de temperatura entre o tubo de calor e o *honeycomb*, já que outros dispositivos eletrônicos dispersam seu calor na estrutura.

A tabela 4 apresenta um sumário de atrasos levantados em várias data de missão.

Tabela 4 – Resultados gerais obtidos e análise estatístico.

Data	Aq.	Precisão	Resf.	Precisão
21/04/2021	8	1 seg	11	1 seg
13/10/2021	8	1 seg	12	1 seg
07/09/2022	8	1 seg	11	1 seg
05/10/2022	9	1 seg	11	1 seg
29/03/2023	8	8 seg	11	1 seg
25/09/2023	7	8 seg	11	1 seg
01/01/2024	8	1 seg	11	1 seg
01/06/2024	10	1 seg	9	1 seg
01/07/2024	8	1 seg	11	1 seg
Média	8.22	-	10.89	-
Máximo atraso	10	-	12	-
Mínimo atraso	7	-	9	-

Fonte: Autor, 2024.

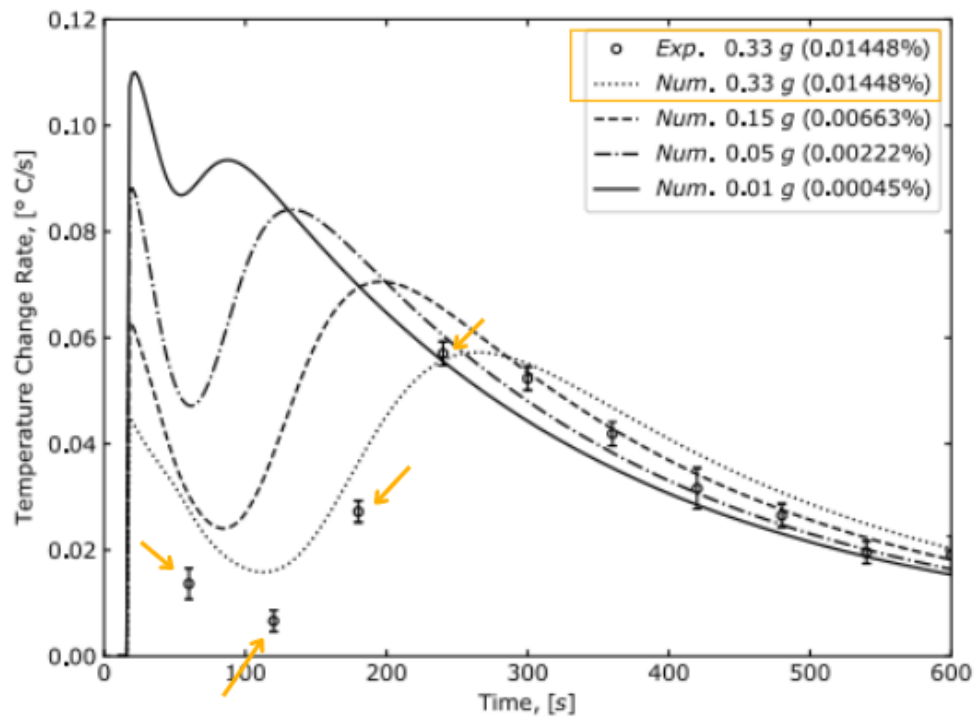
Análise de dados mostra que não houve uma tendência geral de aumento de atrasos ao longo do tempo da missão; estes desvios são resultados de baixa resolução do método de cálculo de atrasos, que é ± 1 segundo que é a taxa máxima da telemetria.

4.6 Resultados de regime transiente do RTUCA

Como descrito no capítulo 4.3, "Resultados Experimentais de Regime Permanente do RTUCA", a réplica do RTUCA contém uma quantidade significativa de gás não condensável (GNC). Isso estabelece um padrão negativo, sugerindo como o TUCA poderia se comportar caso houvesse acúmulo de grandes quantidades de GNC durante a missão.

Dentro do método de regime transiente, existem duas abordagens para identificar a presença de GNC. A primeira envolve a análise do atraso no tempo de resposta entre o evaporador e o condensador, embora esse método seja mais eficaz na detecção de pequenas quantidades de GNC. A segunda abordagem, conforme publicado por Enke et al. (2020), investiga a taxa de mudança de temperatura ($^{\circ}\text{C/s}$) em relação às quantidades de GNC presentes no tubo de calor o perfil característico é apresentado a seguir na Figura 24, os resultados foram obtidos por meio de modelos numéricos que simulam processos transitórios em tubos de calor com diferentes quantidades de GNC.

Figura 24 – Comportamento característico do condensador em tubo de calor com GNC.

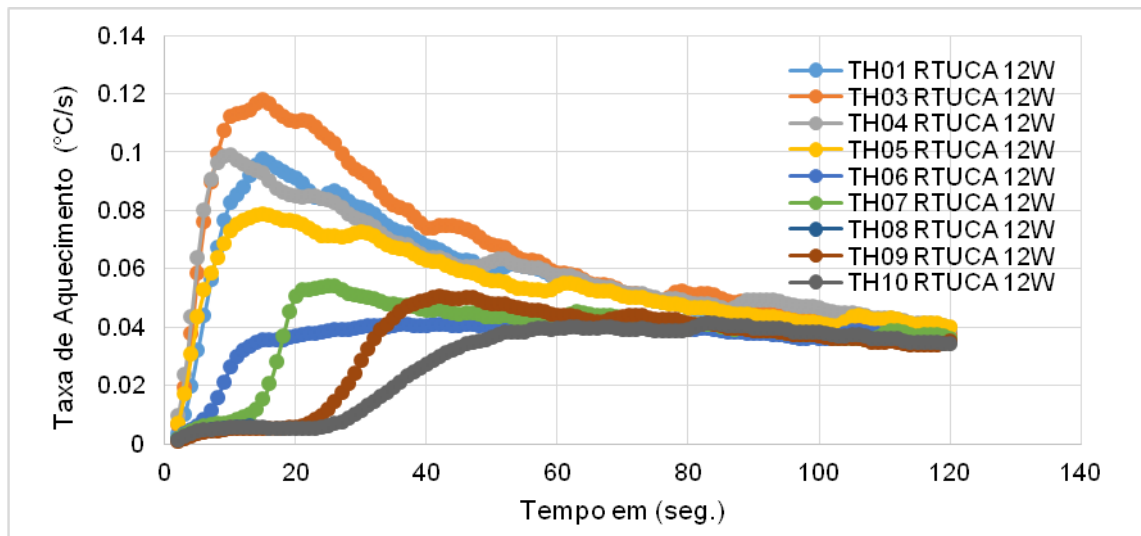


Fonte: Adaptado de (Enke et al., 2020).

Esse método foi utilizado para analisar as taxas de mudança de temperatura no *start-up* para tubo de calor do RTUCA.

Na Figura 25, ilustra o comportamento geral das taxas de aquecimento no experimento RTUCA.

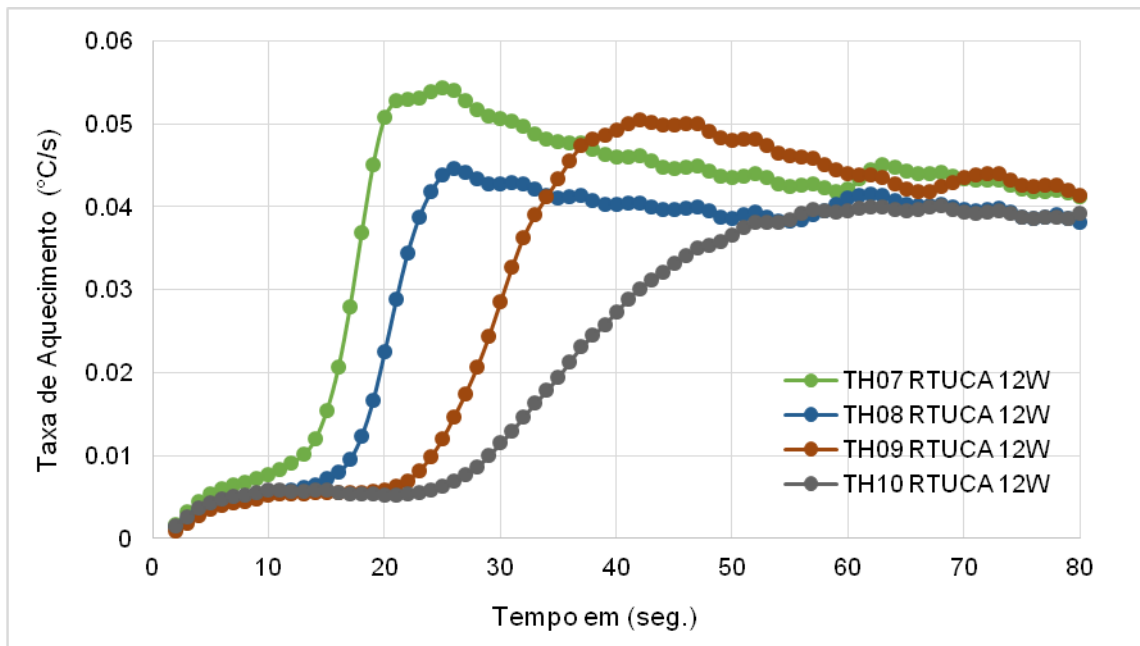
Figura 25 – Comportamento geral das taxas RTUCA.



Fonte: Autor, 2024.

Na Figura 26, será apresentado o comportamento da região do condensador intermediário (middle condenser).

Figura 26 – Comportamento início da região do condensador do RTUCA.

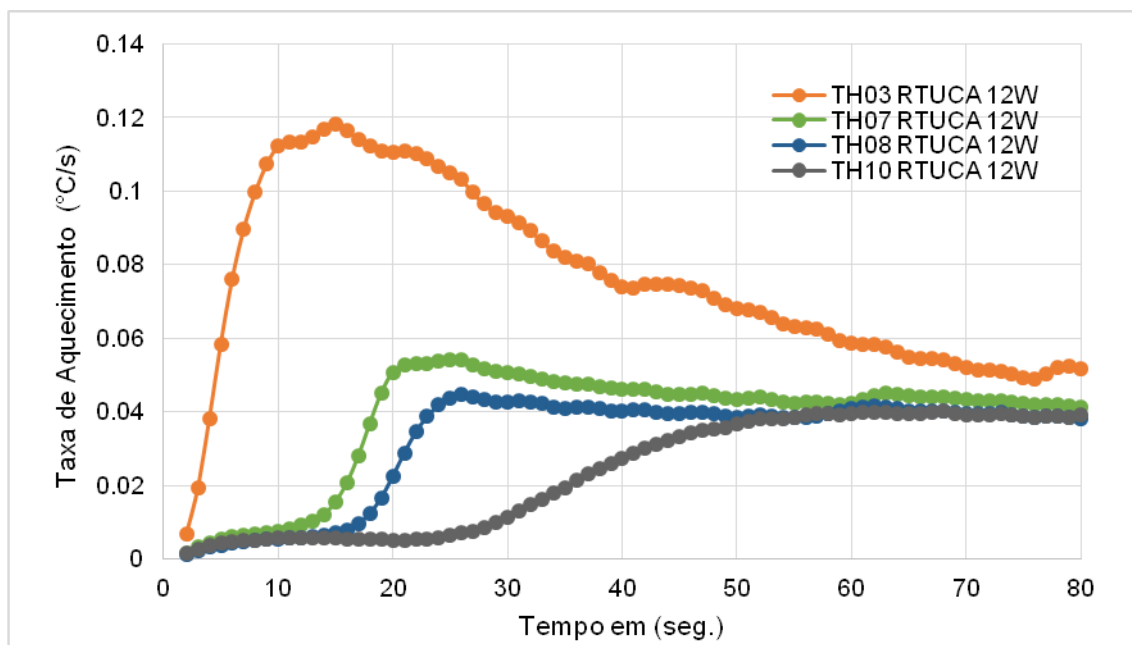


Fonte: Autor, 2024.

Na Figura 26, é possível identificar que a zona difusa se encontra entre os sensores TH06, TH07 e TH08. Nota-se uma considerável diferença na taxa de variação entre a região do evaporador e a do condensador. O comportamento registrado apresenta uma sequência de elevações, quedas e novas elevações, padrão típico de um tubo de calor do RTUCA com grande acúmulo de gás não condensável (GNC), conforme ilustrado anteriormente na Figura 25.

Na Figura 27, ilustra e essa diferença de valor nas taxas.

Figura 27 – Comparativo taxa da região evaporador, zona difusa e condensador do RTUCA.



Fonte: Autor, 2024.

Foi demonstrado que o método de análise de distorção de perfis funciona corretamente para tubo de calor do RTUCA onde existe a presença de grande quantidade de GNC.

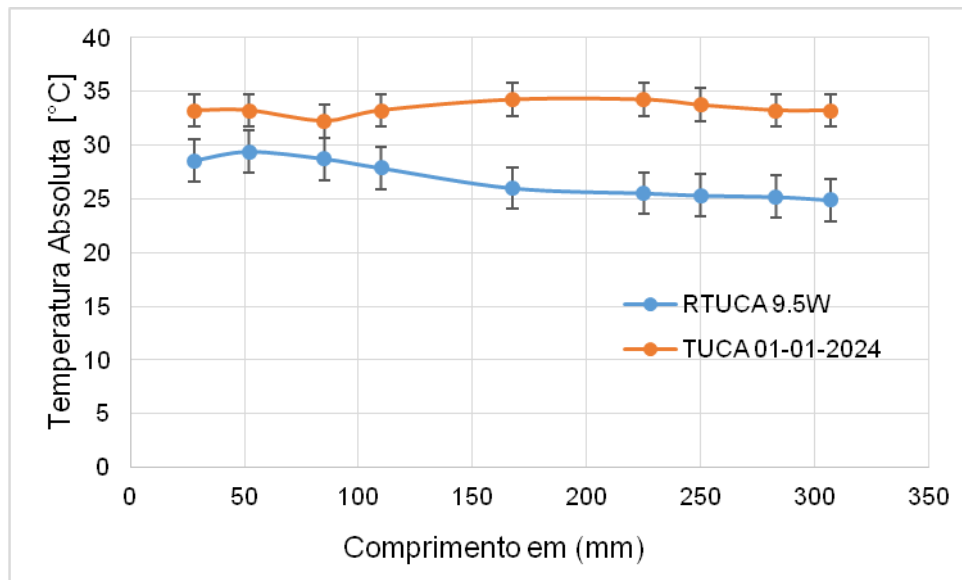
4.7 Comparação de resultados entre TUCA e RTUCA

4.7.1 Comparação em Regime Permanente

Neste tópico será apresentado a comparação em regime permanente do perfis TUCA x RTUCA. Quanto menor o gradiente de temperatura entre evaporador e condensador, mais eficiente é o tubo de calor. Neste caso não é possível uma comparação direta, já que o RTUCA contém GNC. No entanto podemos compreender como é um perfil com GNC, e identificar com mais facilidade se o TUCA irá formar GNC no futuro.

Na Figura 29 será apresentado um comparativo direto entre perfil em regime permanente do TUCA x RTUCA, ambos com carga térmica de 9.5W.

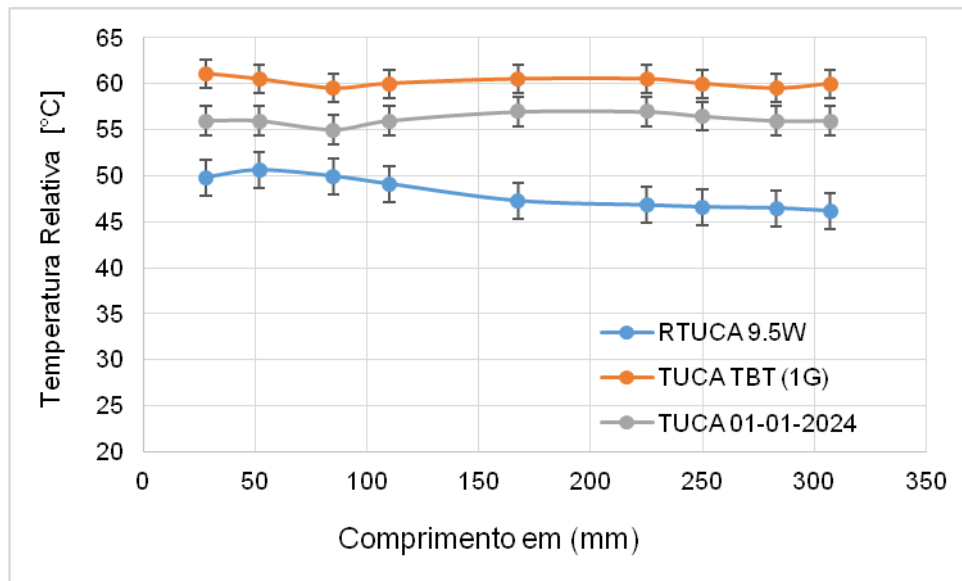
Figura 28 – Perfil em Regime Permanente TUCA x RTUCA.



Fonte: Autor, 2024.

A seguir na Figura 30, será apresentado um comparativo ensaio realizado em vácuo em Teste de Balanço Térmico do satélite AMZ1 (TBT) em laboratório LIT, já com TUCA instalado e funcionando, antes do lançamento do satélite, comparando com o TUCA em órbita sua replica RTUCA em ambiente de laboratório normal.

Figura 29 – Comparativo TUCA (1G) x TUCA x RTUCA.

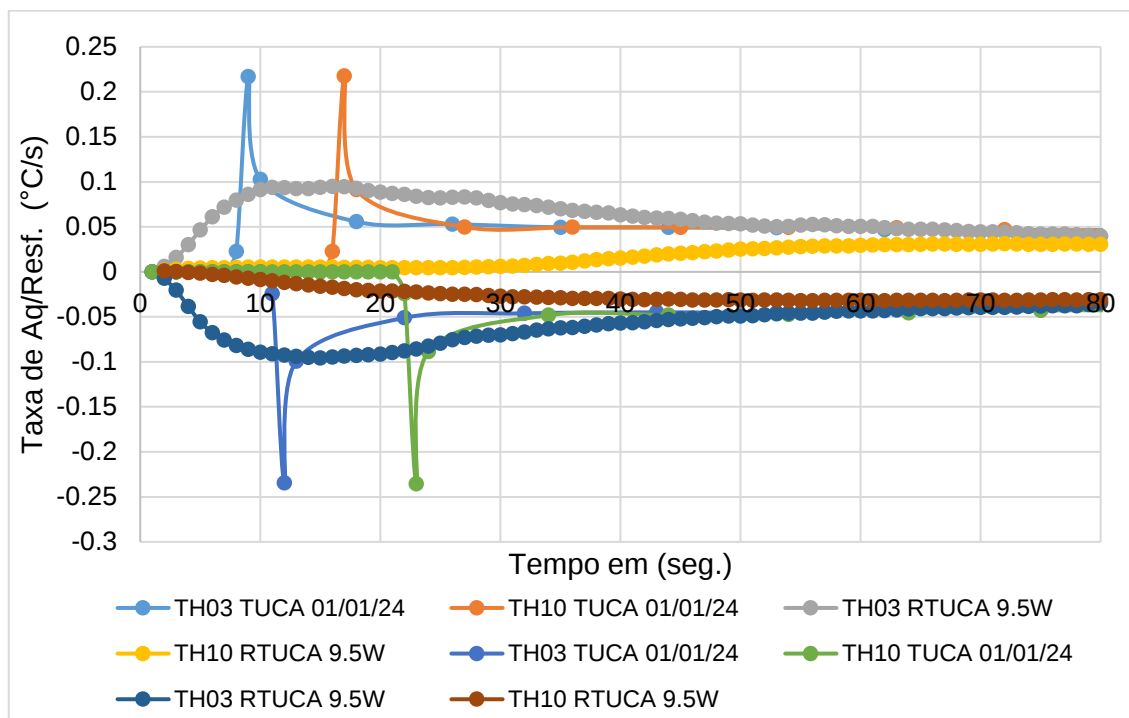


Fonte: Autor, 2024.

4.7.2 Comparação em Regime Transiente

A seguir será apresentado na Figura 30, ilustração de um gráfico que ilustra o comportamento taxa de aquecimento e resfriamento no experimento TUCA e RTUCA. É possível observar que o TUCA responde muito mais rápido e com taxa maior devido a não presença de GNC, enquanto o RTUCA demora sentir o efeito de aquecimento e resfriamento devido à grande acúmulo de GNC no condensador.

Figura 30 – Comparativo entre as taxas no TUCA x RTUCA.



Fonte: Autor, 2024.

É difícil calcular os *delays* com esta quantidade do GNC, entretanto podemos assumir que os picos de taxas no condensador, embora que sejam difíceis de serem detectados (muito suaves), ocorrem nos momentos próximos de 60-70 segundos, que resultam em atrasos em ordem de aproximadamente 50 segundos, que são muito maiores do que no TUCA (8-11 seg).

5 CONCLUSÃO E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

O principal objetivo da bolsa foi concluído com êxito, o qual era determinar se havia formação de gases não condensáveis (GNC) no experimento tecnológico TUCA a bordo do Amazonia-1. Após a análise dos resultados, foi confirmado que não há GNC presentes. Além disso, conseguimos realizar a montagem da réplica laboratorial (RTUCA) dentro do cronograma e conduzir ensaios, nos quais foi identificada a presença de GNC. Este resultado é valioso, pois nos fornece um comparativo direto com o TUCA, possibilitando uma análise detalhada do comportamento de um tubo com características geométricas idênticas, mas com a presença de gás.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a continuidade da análise do TUCA em voo para monitorar o surgimento potencial de GNC, considerando que a vida útil do satélite é de 10 a 12 anos. Esse acompanhamento é crucial para assegurar o funcionamento contínuo do tubo de calor durante toda a missão e sua qualificação para futuras aplicações em satélites.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. BERTOLDO JUNIOR, J. Estudo do desempenho de tubos de calor de alumínio ranhurados na presença de gás não condensável durante testes ambientais. 2017. 229 p. IBI: <8JMKD3MGP3W34P/3P3B6UL>. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/06.05.20.36-TDI). Tese (Doutorado em Mecânica Espacial e Controle) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2017. Disponível em: <<http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34P/3P3B6UL>>.
2. BERTOLDO JUNIOR, J. et al. Experimental performance comparison of axially grooved heat pipes charged with acetone and ammonia. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://plutao.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/plutao/2012/11.28.01.57/doc/Paper_Bertoldo.pdf>.
3. BERTOLDO JUNIOR, J.; Vlassov, V. V.; Cândido, P. A.; Genaro, G. Kiseev, V. M. Experimental performance comparison of axially grooved heat pipes charged with acetone and ammonia. 16th International Heat Pipes Conference, in Lyon, França, May 20-24, 2012.
4. 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.
5. CHI, S. W. Heat pipe theory and practice: A Sourcebook. Washington: Hemisphere, 1976. 242 p.
6. CHI, S.W. Heat Pipe Theory and Practice, A Sourcebook, Hemisphere Publishing Corporation, 1976, pp. 33-95.
7. ENKE, C. Numerical modeling of a heat pipe transient modes. 2020. 103 p. IBI: <8JMKD3MGP3W34R/3UTNQ28>. (sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/02.11.12.10-TDI). Dissertação (Mestrado em Mecânica Espacial e Controle) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos

Campos, 2020. Available from:
<<http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34R/3UTNQ28>>.

8. ENKE, C.; VLASSOV, V. Proof of Existence of Optimal Point of Test Variables to Detect Noncondensable Gas in Heat Pipe Tests. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m16d/2021/11.17.13.56/doc/17%20-%20%5BARTIGO%5D%5BINPE%5D%20Cristiano%20Enke.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2024.

9. ENKE, Cristiano; BERTOLDO JÚNIOR, Jorge; VLASSOV, Valeri. Transient response of an axially-grooved aluminum-ammonia heat pipe with the presence of non-condensable gas. Applied Thermal Engineering, [S.l.], v. 183, parte 1, p. 116135, 2021. ISSN 1359-4311. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431120336152>. Acesso em: 28 mar. 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116135>.

10. FAGHRI, A. Heat Pipe Science and Technology, Taylor & Francis, 1995; 2nd edition 2016.

11. FAGHRI, A. Heat pipe science and technology. USA: Taylor & Francis, 1995. 874 p.

12. MANTELLI, M. B. H.; ÂNGELO, W. B.; BORGES, T. Performance of naphthalene thermosyphons with non-condensable gases – Theoretical study and comparison with data. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 53, n. 17-18, p. 3414–3428, ago. 2010.

13. 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).

14. 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.

15. REAY, D. A.; JOHNSON, M. P. The formation of diacetone alcohol during life tests on acetone heat pipes constructed using aluminum and stainless steel. In: ESA HEAT PIPES, 2., 1976, Bologna. Proceedings... ESA, 1976. p. 393–399.

16. ROSA, R. G.; VLADIMIROVICH, V. V. Estudo experimental e teórico sobre o efeito da inclinação no desempenho de tubos de calor com ranhuras axiais. In: WORKSHOP EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAIS, 14. (WETE), 2023, São José dos Campos. (campo ausente ou vazio: 'booktitle') São José dos Campos: INPE, 2023. On-line. ISSN 2177-3114. IBI: <8JMKD3MGPDW34R/4AG9AM8>. Disponível em: <<http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGPDW34R/4AG9AM8>>.

17. ROSA, R. G.; VLASSOV, V.; COSTA, R. L. Estudo teórico e experimental, testes, montagem e preparação de tubos de calor em ambiente de laboratório. São José dos Campos: INPE, 2023. 78 p. Bolsa PIBIC/PIBITI/INPE/CNPq. IBI: <8JMKD3MGP3W34T/49T3U65>. Disponível em: <<http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34T/49T3U65>>.

18. SANTOS, Nadjara. Desenvolvimento de tubo de calor circuitado (Loop Heat Pipe-LHP) para aplicações espaciais. 2009. 188 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/04.07.18.33>. Acesso em: [data de acesso].

7 APÊNDICE

7.1 Ferramenta Excel para plotagem gráfica perfil temperatura do TUCA

A planilha de nome: **Análise do Comportamento Térmico do Experimento TUCA AMZ-1.**

1. **Objetivo:** Esta planilha é destinada à análise do comportamento térmico do experimento TUCA a bordo do satélite Amazônia-1.
2. **Principais Funções:**
 - a) **Carregar Telemetria:** Importa arquivos de telemetria em formato CSV para análise.
 - b) **Processar Telemetria:** Realiza cálculos e gera gráficos que representam o comportamento térmico dos sensores ao longo do tempo.
 - c) **Ajustar Gráfico:** Permite ajustar a escala dos gráficos gerados, de acordo com os dados processados.
 - d) **Salvar Arquivo:** Orienta o usuário a salvar as versões processadas sem sobrescrever os arquivos originais.
3. **Resultados:** Os gráficos produzidos ajudam a visualizar as variações de temperatura em função do tempo, facilitando a avaliação do desempenho térmico do TUCA durante a missão.

7.2 Ferramenta MS Excel para tratamento de dados do TUCA

A planilha de nome: **Planilha Semi-Automática para Análise de Taxas do TUCA no Amazônia-1**

1. **Objetivo:** Esta planilha semi-automática é voltada para a análise de taxas térmicas do TUCA, fornecendo ferramentas para processamento de dados de temperatura.
2. **Principais Funções:**
 - a) **Carregar Telemetria:** Permite a importação de dados de telemetria no formato adequado.
 - b) **Processamento de dados:** Realiza o processamento dos dados carregados, removendo os dados duplicados, e anotando os instantes que ocorreram a mudanças de temperatura, de forma individual para cada sensor.
 - c) **Ajustar Planilhas:** Permite o ajuste das planilhas específicas de aquecimento e resfriamento após o processamento.
 - d) **Cálculo das Taxas:** Após o ajuste manual da planilhas para igual a temperatura inicial do tubo de calor, é possível realizar executar o macro de taxas, possibilitando o cálculo das taxas de aquecimento e resfriamento.
 - e) **Finalizar o Processo:** Conclui a operação de processamento, garantindo que todas as análises sejam realizadas corretamente.
3. **Resultados:** A planilha facilita a análise das taxas de temperatura, proporcionando uma visão clara e detalhada do desempenho do TUCA em diferentes condições operacionais.

Ambas as planilhas estarão disponíveis até dezembro de 2025 através do link acessível via o QR Code abaixo.

Figura 31 – QrCode para acesso das planilhas.

