



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FERNANDO GONÇALVES DE SOUZA

**CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DE GEYSER BOILING EM
TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS OPERANDO COM DOIS FLUIDOS
SIMULTANEAMENTE**

Florianópolis
2021

Fernando Gonçalves de Souza

**CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DE GEYSER BOILING EM
TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS OPERANDO COM DOIS FLUIDOS
SIMULTANEAMENTE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Fernando H. Milanese, Dr. Eng.

Coorientador: Prof^a. Márcia B. H. Mantelli, Ph.D.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Souza, Fernando Gonçalves de

Caracterização do fenômeno de Geysers Boiling em termossifões bifásicos operando com dois fluidos simultaneamente / Fernando Gonçalves de Souza; orientador, Fernando Henrique Milanese, coorientadora, Marcia Barbosa Henriques Mantelli, 2021.

132 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Geysers Boiling. 3. Amplitude de GB. 4. Frequência de GB. 5. Visualização do GB. I. Milanese, Fernando Henrique. II. Mantelli, Marcia Barbosa Henriques. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Fernando Gonçalves de Souza

**CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DE GEYSER BOILING EM
TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS OPERANDO COM DOIS FLUIDOS
SIMULTANEAMENTE**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Saulo Güths, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Gherhardt Ribatski, Dr.
Universidade de São Paulo (EESC/USP)

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Paulo de Tarso R. de Mendonça, Dr. Eng.
Coordenador do Programa

Prof. Fernando H. Milanese, Dr. Eng.
Orientador

Prof^a. Márcia B. H. Mantelli, Ph.D.
Coorientadora

Florianópolis, 2021.

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais Francisco e Aldaci, a meu irmão Felipe e ao meu primo Renan, que sempre me apoiaram em todos os momentos e me incentivaram de todas as formas nos meus caminhos acadêmicos.

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço primeiramente a Deus.

Aos meus pais Francisco e Aldaci, ao meu irmão Felipe e ao meu primo Renan por sempre acreditarem em mim, confiarem em meu potencial e apoiar em todos os momentos.

Ao meu orientador, professor Dr. Fernando H. Milanese, por toda a sua contribuição, auxiliando em cada etapa da pesquisa. Agradeço a minha coorientadora, professora Dr^a. Márcia B. H. Mantelli, por confiar no meu trabalho e me dar a oportunidade de desenvolver essa pesquisa.

Agradeço, Dr. Luis Hernán Rodríguez Cisterna, que me ajudou em todos os momentos durante a minha pesquisa, doando parte do seu tempo de forma desinteressada para ajudar, me motivar e confiar no meu trabalho.

A toda equipe do laboratório Labtucal: Andreza, Kênia, Leandro, Charles, Juan, Gregori, Nelson, Breno, Pâmela, Kelvin, Larissa, Dijane, João Victor, Joel, Pedro, Ricardo, Carqueja, Daniel e Felipe Dondoni, que ajudaram com valiosos conselhos ao longo do projeto.

A equipe da Alta temperatura: Dr. Luis Hernán Rodríguez Cisterna, Valquíria, Gianpiero, Élvís, Felipe "Mineiro", Felipe Telles, Eduardo, Luciano e Alice, que não mediram esforços em todos os momentos da pesquisa para dar a sua contribuição.

Aos meus amigos: Weinne, Kessy, Paulo, Jerlan, Alex, Ítalo, Monique, Eduardo, Guilherme, Renato, Andreza, Carlos, Everson, Rivaél e Camila, que me ajudaram ao longo dessa trajetória.

Por fim, agradeço a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de mestrado. À UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, através do POSMEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e seu corpo docente, contribuíram, para o meu aprendizado.

*“O que nós vemos das coisas são as coisas.
Porque veríamos nós uma coisa se houvesse outra?
Porque é que ver e ouvir seria iludirmo-nos
Se ver e ouvir são ver e ouvir?”*

*O essencial é saber ver,
Saber ver sem estar a pensar,
Saber ver quando se vê,
E nem pensar quando se vê,
Nem ver quando se pensa.*

*Mas isso (triste de nós que trazemos a alma vestida!),
Isso exige um estudo profundo,
Uma aprendizagem de desaprender”*

(PESSOA, 1946)

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo experimental do fenômeno *Geysers Boiling* em termossifões bifásicos operando com dois fluidos de trabalho simultaneamente, sendo eles: a água destilada e o óleo térmico comercial. O *Geysers Boiling* é um fenômeno que ocorre de maneira cíclica durante o regime de operação do termossifão. Ele é caracterizado por estágios de formação de bolhas bem definidos, em que o fluido de trabalho se encontra em repouso e o acréscimo de calor propicia o crescimento de bolhas que expandem até atingir um tamanho máximo e que, em seguida, explode, pulverizando vapor saturado e líquido sobre as paredes do condensador do termossifão. A amplitude e a frequência em que ocorre esse fenômeno estão relacionadas com as condições em que o dispositivo é submetido, de modo que podem ser intensificadas ou reduzidas. Nesse trabalho, foram conduzidos dois estudos experimentais independentes para investigar o comportamento do *Geysers Boiling*. O primeiro estudo experimental, realizado em um termossifão bifásico de aço inoxidável, teve o objetivo de estudar o desempenho térmico do dispositivo operando em *Geysers Boiling*, bem como a influência na amplitude e na frequência do fenômeno de *Geysers Boiling* a partir da modificação das seguintes condições: razão de volume entre os dois fluidos de trabalho, taxa de transferência de calor fornecida no evaporador e condições de resfriamento no condensador. Para o termossifão de aço, foi observado que, durante o regime de *Geysers Boiling*, o desempenho do dispositivo varia entre um estado de baixo desempenho e um de alto desempenho. Foi observado que o número de Reynolds está associado ao fenômeno e, quando o seu valor é baixo, o dispositivo opera em *Geysers Boiling*. Também existe uma região de transição para o fenômeno. A partir desse experimento, foi proposto um modelo teórico para a amplitude e frequência de formação de *Geysers Boiling*. A equação da amplitude está associada ao chamado “número de liberação de bolha”, que corresponde ao fluxo de calor mínimo necessário para a geração de bolhas com potencial de *Geysers Boiling*. Os resultados experimentais mostraram que, quando este parâmetro é maior que um certo valor, o termossifão opera em regime de *Geysers Boiling*. A equação obtida para a frequência é controlada pelo efeito térmico e está associada ao número de liberação de bolha. A equação para amplitude apresentou um erro percentual menor do que 25% e a equação da frequência um erro inferior a 40% em relação aos dados experimentais. Um segundo estudo, teve como objetivo principal analisar de forma visual e qualitativa a formação da amplitude da bolha. Para isso, foi utilizado um termossifão bifásico de vidro, onde foram impostas diferentes taxas de transferência de calor no evaporador, com diferentes razões de enchimento dos dois fluidos, com o condensador em convecção natural com o ambiente. Nesse experimento, foi observado que a intensidade em que ocorre o GB está associada ao local de surgimento da bolha.

Palavras-chave: *Geysers Boiling*, Amplitude de GB, Frequência de GB.

ABSTRACT

The present work presents an experimental study of the Geysier Boiling phenomenon in two-phase thermosyphons operating with two working fluids simultaneously, namely: distilled water and commercial thermal oil. The Geysier Boiling is a phenomenon that occurs periodically during thermosyphon operation. It is characterized by well-defined stages of bubble formation, where the working fluid is at rest and the addition of heat leads to the growth of bubbles that expand to a maximum size and then explode, spraying saturated steam and liquid on the thermosyphon condenser internal walls. The amplitude and frequency of this phenomenon are related to the conditions to which the device is subjected, so they can be enhanced or reduced, depending. In this work, two experimental studies were carried out to investigate the behavior of Geysier Boiling. The first one, carried out in a two-phase stainless steel thermosyphon, was aimed to study of the thermal performance of the device operating with Geysier Boiling, as well as the influence on the amplitude and frequency of this phenomenon of the parameters volume ratio of the two working fluids, heat transfer rate to the evaporator and the condenser cooling conditions. For the steel thermosyphon, it was observed that, during the Geysier Boiling regime, the performance of the device varies between low and high-performance states. It was observed that the Reynolds number is associated with the phenomenon. The device operates in Geysier Boiling at low Reynolds numbers. A transition region can also be observed. Based on this data, a theoretical model for the amplitude and frequency was proposed. The amplitude model is associated with the called so “bubble release number”, which corresponds to the minimum heat flux needed to generate bubbles with Geysier Boiling potential. The experimental results showed that, when this parameter is larger than a certain threshold value, the thermosyphon operates in a Geysier Boiling regime. The model obtained for the frequency is controlled by the thermal effect and is associated with the bubble release number. The amplitude model showed an error of less than 25% and the frequency equation, an error of less than 40% when compared to experimental data. The main objective of the second experimental study was to analyze, in a visual and qualitative way, the formation of the bubble. A two-phase glass thermosyphon was employed, where different heat transfer rates were provided to the evaporator, with different filling ratios of the two working fluids and with the condenser in natural convection. In this experiment, it was observed that the intensity of GB is associated with the location where the bubble appears.

Keywords: Geysier Boiling, GB Amplitude, GB Frequency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Princípios físicos de funcionamento de um termossifão.	21
Figura 2.2– <i>Geysers Boiling</i> em um termossifão bifásico.	23
Figura 4.1 – Bancada experimental do termossifão de aço.	39
Figura 4.2 – Seção de teste da bancada experimental.	40
Figura 4.3 – Bancada experimental.	41
Figura 4.4 – Transientes de temperaturas do Termossifão 1 para 20W.	45
Figura 4.5 – Transientes de temperaturas do Termossifão 1.	46
Figura 4.6 – Estágios do surgimento da bolha de GB.	47
Figura 4.7 – Transientes de temperaturas dos termossifões estudados: (a) Termossifão 2; b) Termossifão 3; c) Termossifão 4; d) Termossifão 5; e) Termossifão 6; e f) Termossifão 7.	48
Figura 4.8 – Transientes das temperaturas médias, número N e número de liberação de bolha do termossifão 1.	51
Figura 4.9 – Transientes das temperaturas médias, número N e número de liberação de bolha do termossifão 2.	52
Figura 4.10 – Transientes das temperaturas médias, número N e número de liberação de bolha do termossifão 3.	53
Figura 4.11 – Transientes das temperaturas média, número N e número de liberação de bolha do termossifão 4.	54
Figura 4.12 – Transientes das temperaturas médias, número N e número de liberação de bolha do termossifão 5.	55
Figura 4.13 – Transientes das temperaturas médias, número N e número de liberação de bolha do termossifão 6.	56
Figura 4.14 – Transientes das temperaturas médias, número N e número de liberação de bolha do termossifão 7.	57
Figura 4.15 – Representação esquemática dos termossifões 1 e 2.	59
Figura 4.16 – Representação esquemática dos termossifões: 6, 3 e 1.	62
Figura 4.17 – Frequência em função do número de liberação de bolha.	64
Figura 4.18 – Número de liberação de bolha em função do número de Reynolds.	66
Figura 4.19 – Circuito de resistências térmicas de um termossifão.	69
Figura 4.20 – Resistência térmica em função do número de Reynolds para a condição de alto desempenho.	72

Figura 4.21– Resistência térmica em função do número de Reynolds para a condição de baixo desempenho.	73
Figura 4.22– Comparação entre a resistência térmica teórica e resistência experimental para a condição de alto desempenho.	75
Figura 4.23– Comparação entre a resistência térmica teórica e resistência experimental para a condição de baixo desempenho.	75
Figura 4.24 – Número de Jakob corrigido em função do número de Reynolds.	78
Figura 4.25 – Comportamento do número de confinamento corrigido em função do número de Jakob corrigido.	79
Figura 4.26 – Coeficiente angular em função do fator de enchimento relativo.	82
Figura 4.27 – Comparação entre a correlação proposta para o Número de confinamento corrigido em função do número de Jakob corrigido e os dados experimentais.	83
Figura 4.28 – Modelo teórico para o número de liberação de bolha em função da temperatura de vapor e comparação com dados experimentais.	84
Figura 4.29 – Desvio entre os dados experimentais e a correlação proposta para o número de liberação.	85
Figura 4.30 – Comparação entre dados experimentais e modelo proposto para frequência e a amplitude de GB em função da temperatura de vapor.	87
Figura 4.31 – Erro médio da Equação 4.24 quando comparada com dados experimentais.	88
Figura 5.1 – Bancada de visualização do fenômeno GB.	91
Figura 5.2 – Bancada do termossifão de vidro.	91
Figura 5.3 – Visualização do GB para o fator de enchimento de 60% água.	95
Figura 5.4 – Visualização do GB para o fator de enchimento de 60% água e 40% óleo.	96
Figura 5.5 – Temperaturas médias do termossifão de vidro que opera com 60% água e 40% óleo.	97
Figura 5.6 – Número N em função do tempo para o teste com termossifão de vidro carregado com 60% água e 40% óleo.	98
Figura 5.7 – Pontos de formação da bolha para 60% água e 40% óleo.	99
Figura 5.8 – Número N em função do tempo para o termossifão de vidro com 60% de água.	101
Figura 5.9 – Pontos de formação da bolha para 60% água.	102
Figura 5.10 – Número N em função do tempo para o termossifão de vidro com 60% de água e 20% de óleo.	103

Figura 5.11 – Pontos de formação da bolha para o termossifão de vidro com 60% de água e 20% de óleo.	104
Figura 5.12 – Número N em função da distância do sítio de nucleação a interface para o termossifão de vidro.	105
Figura 5.13 –Bolha de vapor de água ao atravessar a camada de óleo.....	106
Figura 5.14 – Mistura emulsificada de água e óleo.	107
Figura 5.15 – Arrasto do líquido proveniente do condensador.	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros do termossifão que influencia no GB.	24
Tabela 3.1 – Correlações da literatura para frequência.	36
Tabela 3.2 – Equações para a frequência em função do número de liberação de bolha.	37
Tabela 4.1 – Razões de enchimento para o termossifão de aço inoxidável.....	43
Tabela 4.2 – Número N médio, amplitude média de GB e frequência média de GB para uma mesma condição de operação.	61
Tabela 4.3 – Variabilidade entre os dados experimentais e o número de confinamento.	78
Tabela 4.4 – Coeficientes α_1 para cada teste.	81
Tabela 4.5 – Equações para a frequência em função do número de liberação de bolha.	86
Tabela 5.1 – Razões de enchimento para o termossifão de vidro.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BT	Banho Térmico
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
FISPQ	Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos
GB	<i>Geyser Boiling</i>
LABTUCAL	Laboratório de Tubos de Calor
POSMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino

A_{cond}	Área externa do condensador	[m ²]
A_{evap}	Área externa do evaporador	[m ²]
a_1	Coefficiente angular	[-]
a_{1H}	Coefficiente angular relacionado a pressão hidrostática	[-]
a_{1M}	Coefficiente angular relacionado ao “efeito membrana”	[-]
Bo	Número de Bond	[-]
Bo_c	Número de Bond corrigido	[-]
C	Constante	[-]
C_1	Constante para o número de liberação atribuída ao fluido de trabalho	[-]
C_2	Constante atribuída aos efeitos da inércia do fluido	[-]
C_3	Constante atribuída aos efeitos térmicos do fluido	[-]
C_d	Coefficiente de arrasto da bolha	[-]
Co	Número de confinamento	[-]
Co'	Número de confinamento corrigido	[-]
c_{pl}	Calor específico na fase líquida	[J/(kgK)]
d_b	Diâmetro de partida de uma bolha	[m]
D_{int}	Diâmetro interno do termossifão	[m]
D_{ext}	Diâmetro interno do termossifão	[m]
f	Frequência	[Hz]
F_R	Fator de enchimento relativo	[-]
F_1	Fator de enchimento da água	[-]
F_2	Fator de enchimento do óleo	[-]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
Ge^*	Número adimensional	[-]
Gr	Número de Grashof	[-]
Gr_c	Número de Grashof corrigido	[-]
h_{cond}	Coefficiente de transferência de calor do termossifão na região do condensador	[W/(m ² K)]

h_e	Coeficiente de transferência de calor por ebulição	[W/(m ² K)]
h_{evap}	Coeficiente de transferência de calor do termossifão na região do evaporador	[W/(m ² K)]
h_{lv}	Calor latente de vaporização por unidade de massa	[J/kg]
Ja	Número de Jakob	[-]
Ja_c	Número de Jakob corrigido	[-]
k_l	Condutividade térmica do líquido	[W/(m K)]
k_w	Condutividade térmica da parede do termossifão de aço	[W/(m K)]
l_c	Comprimento do condensador	[m]
l_e	Comprimento do evaporador	[m]
L_m	Comprimento característico da bolha	[m]
n	Relação entre a distância do sítio de nucleação à interface e a altura da coluna de água	[-]
m	Constante de ajuste	[-]
N	Número adimensional N	[-]
P_0	Pressão do sensor de pressão no início da região de aquecimento	[Pa]
P	Pressão do sensor de pressão após a região de aquecimento	[Pa]
P_s	Pressão do sensor de pressão	[bar]
P_{sat}	Pressão de saturação	
\bar{P}	Pressão média para o estado estacionário	[Pa]
Pr_l	Número de Prandtl	[-]
Re_D	Número de Reynolds	[-]
q	Taxa de transferência de calor	[W]
q''_{GB_0}	Fluxo de calor mínimo para a geração de bolhas com potencial de GB	[W/m ²]
R_1	Resistência térmica externa ao evaporador	[K/W]
R_2	Resistência térmica de condução na direção radial	[K/W]
R_3	Resistência térmica de evaporação	[K/W]
R_4	Resistência térmica na interface líquido-vapor no evaporador	[K/W]
R_5	Resistência térmica associada a queda de temperatura de saturação entre o evaporador e o condensado	[K/W]
R_6	Resistência térmica na interface líquido-vapor no condensador	[K/W]
R_7	Resistência térmica de condensação	[K/W]

R_8	Resistência térmica de condução radial através do condensador	[K/W]
R_9	Resistência térmica externa ao condensador	[K/W]
R_{10}	Resistência térmica de condução na direção axial	[K/W]
R_{MT}	Resistência térmica do modelo teórico	[K/W]
R_T	Resistência térmica	[K/W]
t	Tempo	[s]
T	Temperatura após a região de aquecimento	[K]
T_0	Temperatura no início da região de aquecimento	[K]
T_c	Temperatura da parede do condensador	[K]
T_e	Temperatura da parede do evaporador	[K]
$T_{med.Adiabática}$	Temperatura média da seção adiabática	[K]
$T_{med.Ambiente}$	Temperatura média do ambiente	[K]
$T_{med.Condensador}$	Temperatura média da seção do condensador	[K]
$T_{med.Evaporador}$	Temperatura média da seção do evaporador	[K]
T_{sat}	Temperatura de saturação	[K]
T_v	Temperatura da fase de vapor	[K]
x_{Vdc}	Tensão de saída	[mV]

Alfabeto grego

α_l	Difusividade térmica na fase líquida	[m ² /s]
ΔP	Diferença de pressão	[Pa]
ΔP^*	Diferença de pressão normalizada	[-]
ΔT	Diferença entre temperatura entre o evaporador e o condensador	[K]
ΔT^*	Diferença temperatura normalizada	[-]
ΔT_{max}	Diferença entre temperatura máxima e mínima	[K]
ΔT_w	Diferença entre temperatura da parede do evaporador e temperatura de saturação	[K]
K_l	Parâmetro adimensional (Eq. 3.2)	[-]
μ_l	viscosidade dinâmica na fase líquida	[Pa · s]
ν_l	Viscosidade cinemática do líquido	[m ² /s]

ρ_1	Massa específica da fase líquida da água	[kg/m ³]
ρ_2	Massa específica da fase líquida do óleo	[kg/m ³]
ρ_l	Massa específica da fase líquida	[kg/m ³]
ρ_v	Massa específica da fase de vapor	[kg/m ³]
σ	Tensão superficial	[N/m]
φ_b	Número de liberação de bolha	[-]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS	20
2.2	FENÔMENO DE <i>GEYSER BOILING</i>	22
2.3	TERMOSSIFÕES COM DOIS FLUIDOS DE TRABALHO	29
3	MODELO ANALÍTICO	32
3.1	CORRELAÇÃO PARA AMPLITUDE DO <i>GEYSER BOILING</i>	32
3.2	CORRELAÇÃO PARA FREQUÊNCIA DO <i>GEYSER BOILING</i>	35
4	ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO DOS TERMOSSIFÕES OPERANDO COM DOIS FLUIDOS DE TRABALHO	38
4.1	BANCADA EXPERIMENTAL	38
4.2	METODOLOGIA	41
4.2.1	Carregamento	41
4.2.2	Procedimento experimental	43
4.3	RESULTADOS PARA O TERMOSSIFÃO DE AÇO	44
4.3.1	CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DE <i>GEYSER BOILING</i>	44
4.3.1.1	<i>Efeito da razão de enchimento em termossifões com um único fluido de trabalho. .</i>	58
4.3.1.2	<i>Efeito da razão de enchimento em termossifões operando com dois fluidos de trabalho (água – óleo).....</i>	60
4.3.1.3	<i>Efeito do número de Reynolds no GB em termossifões.</i>	65
4.3.2	DESEMPENHO TÉRMICO DOS TERMOSSIFÕES OPERANDO COM DOIS FLUIDOS DE TRABALHO	67
4.3.3	VALIDAÇÃO DOS MODELOS PROPOSTOS PARA AMPLITUDE E FREQUÊNCIA DE GB	76

4.3.3.1	<i>Validação do modelo para a amplitude do Geysler Boiling</i>	77
4.3.3.2	<i>Validação do modelo para a frequência do Geysler Boiling</i>	85
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
5	ESTUDO DE VISUALIZAÇÃO DO FENÔMENO DE <i>GEYSER BOILING</i>	90
5.1	BANCADA EXPERIMENTAL	90
5.2	METODOLOGIA	92
5.2.1	Carregamento	92
5.2.2	Procedimento experimental	94
5.3	ESTUDO DE VISUALIZAÇÃO DO <i>GEYSER BOILING</i>	94
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
6	CONCLUSÃO	109
6.1	TRABALHOS FUTUROS	111
	REFERÊNCIAS	113
	APÊNDICE A – PROPRIEDADES DOS FLUIDOS DE TRABALHO	118
	REFERÊNCIA DO APÊNDICE A	118
	APÊNDICE B – ANÁLISE DE INCERTEZA	120
	REFERÊNCIA DO APÊNDICE B	125

1 INTRODUÇÃO

Termossifões bifásicos são dispositivos passivos que operam em um ciclo fechado de vaporização e condensação, o que permite transferir altas taxas de transferência de calor com pequenos gradientes de temperatura. Estes dispositivos são divididos em três regiões principais: evaporador, seção adiabática e condensador, tendo como restrição o posicionamento do evaporador (fonte quente) abaixo do condensador (fonte fria), de maneira que o fluido condensado possa voltar até o evaporador pela ação da gravidade. Contudo, em algumas aplicações, a fonte de fornecimento de calor (fonte quente) se encontra acima da fonte de rejeição de calor (fonte fria), como nos casos de coletores solares e plataformas de petróleo *offshore*. Para a utilização de termossifões bifásicos nestes tipos de aplicações, torna-se obrigatório a inversão do posicionamento do evaporador e condensador, chamado por alguns autores (Duda, Dobrianski e Chludzinski, 2018) de termossifões antigravidade.

Os termossifões antigravidade tem sido alvo de diversos trabalhos na literatura, entre os quais se destacam o trabalho realizado por Roberts (1982 *apud* Dobriansky *et al.*, 2010) o qual apresenta um termossifão antigravidade que opera assistido por um sistema de bombeamento mecânico, usando uma fonte de energia externa. A principal desvantagem do seu sistema é que a operação não acontece de forma passiva. De Beni e Friesen (1985) desenvolveram um termossifão antigravidade que possuía um reservatório de líquido condensado acima do evaporador. Neste dispositivo, a própria pressão do vapor do termossifão gerava força motriz necessária para o transporte do líquido condensado do condensador até o reservatório. Para o retorno do líquido do reservatório para o evaporador, o sistema utilizava uma válvula de flutuação autoatuada que equalizava as pressões do evaporador e o reservatório, permitindo o retorno do líquido ao evaporador pela ação da gravidade. Filippeschi (2006) destaca a grande dificuldade que existe para transportar o líquido condensado do reservatório (acima do evaporador) até o evaporador, através de um dreno que comunica ambas seções. Este autor aponta três possíveis maneiras de se drenar o condensado: diminuindo a pressão do evaporador; aumentando a pressão no reservatório, ou eliminando a diferença de pressão, por meio do nivelamento entre o reservatório e o evaporador. Estas soluções são possíveis através da utilização de válvulas do tipo *on-off* que permitiriam o controle e variação das pressões das seções onde são montadas. Dobrianski (2012) desenvolveu um termossifão que permite a transferência de calor quando o evaporador está acima do condensador. O dispositivo apresenta um reservatório de líquido condensado (acima do evaporador) e opera com dois fluidos de

trabalho: um é responsável pelas trocas térmicas e o outro, por apresentar baixo ponto de ebulição, atua como agente de bombeamento. O retorno do líquido condensado para o evaporador acontece por meio de uma válvula de controle que tem o seu acionamento quando existe uma baixa pressão no evaporador e uma alta pressão no reservatório.

Desta maneira, a utilização de válvulas *on-off* são indispensáveis para garantir o retorno do líquido condensado do reservatório até o evaporador. A utilização das válvulas *on-off* permitem gerar um gradiente de pressão favorável, isto é, queda de pressão no evaporador ou aumento de pressão no reservatório. Nesse contexto, termossifões bifásicos que operam no regime de *Geysier Boiling* (GB), possuem um comportamento oscilatório da temperatura e da pressão de vapor durante a formação e liberação da bolha. Estas oscilações são cíclicas e bem-comportadas e, com o controle adequado, podem ser manipuladas de maneira que possam atuar como uma válvula do tipo *on-off* em termossifões antigravidade.

O fenômeno *Geysier Boiling* (GB) é um evento que ocorre durante o funcionamento de termossifões bifásicos sob certas condições. Este fenômeno é caracterizado pela formação de uma grande bolha de vapor originada pela mudança de fase do fluido de trabalho, que é aquecido na região do evaporador do dispositivo. A piscina líquida do fluido de trabalho atinge um estado de elevada metaestabilidade, de modo que o fornecimento de energia proveniente do evaporador, favorece a formação de uma bolha nucleada que cresce abruptamente, sendo impulsionada violentamente em direção à extremidade do condensador, propelindo consigo líquido e vapor. Em seguida, o líquido retorna à piscina, que entra em repouso e começa um novo ciclo de GB.

A influência do GB nos mecanismos de transferência de calor no termossifão são irrisórias (FAGHRI, 1995), apesar do alto nível de oscilações de temperatura e pressão observadas no dispositivo. Para alguns autores, o GB interfere no desempenho térmico do dispositivo (MANTELLI, COLLE e DE CARVALHO, 1999) e para outros (JAFARI *et al.*, 2016), o desempenho térmico dos termossifões, em geral, não é prejudicado. Segundo Cisterna *et al.* (2020a) o termossifão operando no regime de GB pode apresentar dois tipos de desempenho (alto e baixo). O baixo desempenho acontece antes da bolha estourar e o alto desempenho logo depois da bolha estourar. Contudo, recomenda-se evitar a operação de termossifões no regime de GB, para prevenir falhas por fadiga termomecânica que podem danificar o invólucro do termossifão e afetar o dispositivo onde o termossifão é montado (JAFARI *et al.*, 2016).

Diversos autores (KHAZAEI *et al.*, 2010; ALAMMAR *et al.*, 2018; CISTERNA *et al.*, 2020a), apontam que o GB em termossifões bifásicos é influenciado pelos

seguintes parâmetros: taxa de transferência de calor, coeficiente de transferência de calor externo ao condensador, fluido de trabalho, razão de enchimento, razão de aspecto, pressão de operação, inclinação do tubo e comprimento do evaporador. Esses parâmetros podem interferir no comportamento do dispositivo, possibilitando ou não a operação em regime de *Geysier Boiling*.

Além disso, durante o regime de GB, esses parâmetros são responsáveis pela intensificação ou redução da variação de temperatura (amplitude de temperatura), variação de pressão e ciclo de ocorrência do fenômeno (frequência de GB). Grande parte dos trabalhos desenvolvidos em relação ao GB tentam descobrir formas de impedir a ocorrência do fenômeno em termosifões bifásicos a partir da modificação das condições impostas ao dispositivo. Para isso, alguns autores sugerem: aumentar a taxa de transferência de calor (Alammar *et al.*, 2018; Xia *et al.*, 2017; Jouhara *et al.*, 2016); diminuir o coeficiente de transferência de calor externo ao condensador (Khazaei *et al.*, 2010); diminuir a razão de enchimento (Kempers e Elkholy, 2020), etc.

Contudo, existem certas características do fenômeno de GB que podem ser utilizadas em aplicações onde as oscilações da pressão e temperatura de operação do termosifão podem simular o comportamento de uma válvula do tipo *on-off*. Desta forma, a principal motivação deste trabalho está na caracterização do fenômeno de GB em termosifões que operam com dois fluidos de trabalho de maneira que se possa controlar e prever as amplitudes e as frequências das oscilações de pressão e temperatura de vapor durante o regime de GB. Também, tem-se como motivação a utilização deste fenômeno como um sistema passivo de retorno do líquido condensado desde o condensador até o evaporador em termosifões antigravidade. Para isso é necessário a utilização de dois fluidos de trabalho operando simultaneamente no termosifão, onde fluido primário (água destilada) é o responsável pelo transporte de calor, e o fluido secundário (óleo térmico) é o responsável da geração e controle do GB.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal da presente dissertação de mestrado é:

- Estudar analítica e experimentalmente o fenômeno de *Geysier Boiling* em termosifões que operam com dois fluidos de trabalho simultaneamente.

Para que esse objetivo principal pudesse ser alcançado, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Revisar o estado da arte sobre o fenômeno *Geysers Boiling*;
- Estudar experimentalmente os parâmetros de influência na oscilação de temperatura e na ocorrência do GB;
- Desenvolver um modelo analítico, que permita caracterizar a oscilação de temperatura e que preveja a ocorrência do fenômeno;
- Realizar um estudo de visualização do GB em termossifões operando com um e dois fluidos de trabalho.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução: são apresentados os objetivos do presente trabalho.
- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: é apresentada uma revisão da literatura a respeito do fenômeno de *Geysers Boiling*. Nesta seção são introduzidos conceitos, parâmetros que influenciam a ocorrência do fenômeno, e alguns critérios para determinar a ocorrência do GB.
- Capítulo 3 – Modelo Analítico: é apresentado o modelo analítico para o fenômeno *Geysers Boiling*, o modelo apresentado busca descrever a amplitude de GB e a frequência do fenômeno.
- Capítulo 4 – Estudo do Desempenho Térmico dos Termossifões Operando com Dois Fluidos de Trabalho: nesse capítulo, é analisado o desempenho do termossifão durante o regime de GB, as características relacionadas a esse regime e o modelo analítico para a amplitude e frequência de GB.
- Capítulo 5 – Estudo de Visualização do Fenômeno de *Geysers Boiling*: nesse capítulo, são analisados a formação do GB e a relação existente entre o local de formação da bolha geradora de GB e a amplitude do fenômeno;

- Capítulo 6 – Conclusão: Neste capítulo são resumidas as observações e conclusões mais importantes percebidas ao longo do desenvolvimento da presente dissertação.

A contribuição, da presente dissertação, para o estado da arte está no entendimento dos fenômenos que originam e governam o GB. Além disso, é apresentado um modelo teórico para a predição da oscilação de temperatura e da frequência de ocorrência de GB.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são expostos alguns conceitos físicos sobre o termossifão bifásico sendo estudados: o princípio de funcionamento, as limitações e o fenômeno *Geyser Boiling* (GB), que está associado a instabilidade que ocorre no dispositivo. Além disso, são apresentados termossifões que operam com dois fluidos de trabalho e seu princípio de operação.

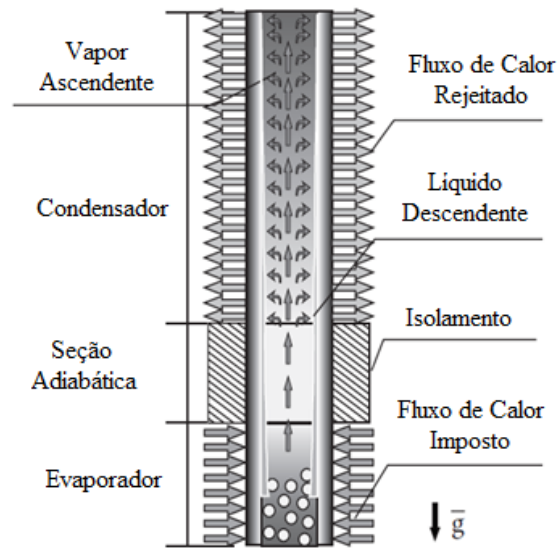
2.1 TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS

Termossifões bifásicos são dispositivos passivos de alta eficiência térmica que operam em um ciclo fechado de vaporização e condensação de um fluido de trabalho. Em sua forma mais simples, é constituído por um tubo selado (invólucro) em alto vácuo, no qual uma quantidade controlada de líquido (fluido de trabalho) é inserida, fazendo com que o fluido de trabalho opere em condições de saturação.

O termossifão bifásico pode ser dividido em três regiões principais: evaporador, seção adiabática e condensador. O evaporador é a região na qual o calor é fornecido ao fluido de trabalho, o qual vaporiza e se expande ao longo do tubo. A região adiabática é caracterizada pela presença de vapor saturado resultante da vaporização ocorrida no evaporador. O condensador é a região onde ocorre a retirada de calor, que por sua vez condensa o vapor. Assim, o funcionamento do termossifão bifásico acontece a partir da vaporização do fluido de trabalho, que é transportado da região do evaporador para o condensador, onde retorna à fase líquida. Na condensação do vapor, o líquido, por ser mais denso, retorna ao evaporador devido ao efeito gravitacional, fazendo com que o ciclo de funcionamento do dispositivo recomece. Quando o dispositivo opera em regime permanente, a quantidade de calor fornecida no evaporador é a mesma removida no condensador. Na Figura 2.1 é apresentado um termossifão bifásico e o seu princípio de funcionamento.

Um termossifão bifásico está sujeito a limites de operação, que determinam a sua máxima capacidade de transferir calor. Esses limites são decorrência do comportamento e das condições físicas de operação às quais o dispositivo está sujeito.

Figura 2.1 - Princípios físicos de funcionamento de um termossifão.



Fonte: Mantelli (2013).

Há diversos limites que podem ser considerados, porém os mais importantes são aqueles críticos, que podem impedir a operação do dispositivo. Os principais limites teóricos reportados na literatura para termossifões bifásicos são:

- a) Limite de arrasto: originado através da interação entre os fluxos contracorrente de vapor e líquido que ocorre na interface líquido-vapor. A força cisalhante viscosa na interface líquido-vapor retarda o retorno do líquido do condensador para o evaporador, o que pode resultar em uma secagem do evaporador (MANTELLI, 2021).
- b) Limite de ebulição: ocorre devido à ebulição nucleada no evaporador. O aumento sucessivo ao fluxo de calor crítico faz as bolhas coalescerem e formarem um filme de vapor na parede do evaporador do termossifão, impossibilitando o líquido de tocar na parede, ou seja, secando a superfície (FAGHRI, 1995).
- c) Limite sônico: ocorre principalmente em baixas densidades de vapor, quando a taxa de escoamento mássico de vapor atinge a velocidade sônica. O calor aportado a partir deste limite não consegue ser transportado, uma vez que o vapor não consegue se deslocar com velocidade maior que a sônica, ou seja, ocorre um bloqueio sônico no deslocamento do vapor (OCHTERBECK, 2003).

- d) Limite viscoso: ocorre para temperaturas de operação baixas, em que a diferença de pressão de vapor entre evaporador e condensador também são baixas. As forças viscosas na região de vapor podem ser maiores que os gradientes de pressão causados pelo campo de temperatura imposto. Quando isso ocorre, o gradiente de pressão do vapor pode não ser suficiente para gerar escoamento, de forma a causar estagnação do vapor (LEE, 2011).

Além dos limites de operação, como os acima mencionados, existe um fenômeno observado em termossifões bifásicos que está associado a instabilidades que ocorrem no dispositivo, que por sua vez, originam flutuações na temperatura, na pressão e no fluxo mássico (LI, *et al.*, 2018). Esse fenômeno está associado ao rápido crescimento de bolhas de vapor de grande tamanho na piscina de líquido e é conhecido por *Geysers Boiling* (GB), o qual será descrito a seguir.

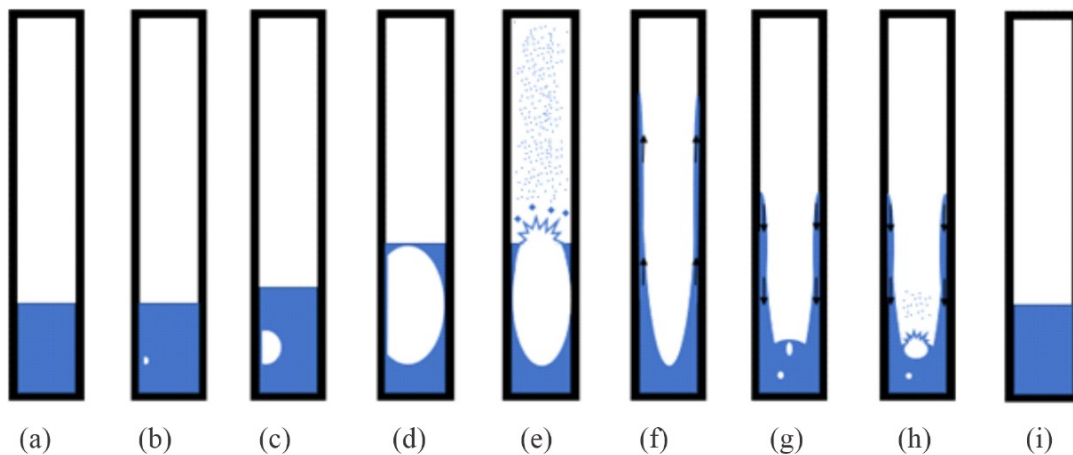
2.2 FENÔMENO DE *GEYSER BOILING*

O fenômeno *Geysers Boiling* (GB), também denominado por ebulição intermitente (CISTERNA, 2019), ocorre na primeira etapa de liberação de energia na mudança de fase do fluido de trabalho em termossifões bifásicos. Segundo Pabón (2019), o fenômeno acontece quando a piscina de líquido recebe energia do evaporador e atinge um estado de elevada metaestabilidade. Uma vez reunidas certas condições, uma bolha de vapor é nucleada e cresce subitamente, sendo impulsionada violentamente em direção à extremidade do condensador. Ao atingir a interface líquido-vapor da piscina, a bolha explode, propelindo líquido e vapor saturados sobre as superfícies internas das paredes do condensador. Posteriormente, o líquido volta para a seção do evaporador como um filme fino nas paredes do tubo, encontrando a piscina do fluido de trabalho. Depois de perder energia usada na formação da bolha, a piscina do fluido de trabalho entra em repouso e, mantidas as mesmas condições, o fluido de trabalho começa novamente a armazenar energia térmica, até alcançar um estado de metaestabilidade, quando apresenta novamente condições propícias para um novo GB, com reinício do fenômeno.

A Figura 2.2 apresenta um esquema simplificado do ciclo de *Geysers Boiling* em termossifões bifásicos. Inicialmente, o fluido de trabalho se encontra em repouso e em condições próximas ao ambiente externo (Fig. 2.2a). Quando uma certa quantidade de calor é inserida no evaporador, a piscina do fluido de trabalho começa a armazenar energia térmica (aumentando sua temperatura), de modo que o fluido de trabalho entra em uma condição metaestável, isto é, permanece ainda na fase líquida embora em condições não estáveis.

Segundo Pabón (2019), essa condição de metaestabilidade origina a formação de uma bolha, a qual cresce sob condições de pressão subatmosférica e, portanto, os efeitos inerciais dominam seu crescimento (Fig. 2.2b). A formação, o crescimento e a partida da bolha acontecem quase que instantaneamente (período de tempo muito curto) (Figs. 2.2b a 2.2d), sendo esse período influenciado principalmente pelas forças viscosas do fluido de trabalho. Ao atingir a interface líquido-vapor da piscina líquida (Fig. 2.2e), acontece uma ruptura da bolha, momento em que ocorre a pulverização do líquido ao mesmo tempo em que o vapor é espirrado sobre as paredes do condensador, onde acontece a mudança de fase para líquido. O líquido condensado forma uma camada de filme fino que cobre as paredes do termossifão (Fig. 2.2f), retornando pela ação da gravidade para a piscina líquida (Fig. 2.2g). Algumas bolhas de vapor ficam presas na piscina de líquido (Fig. 2.2g) servindo assim como sítio de nucleação de outras bolhas, agora de menor porte, que voltam a se romper, espalhando vapor e líquido na forma de spray (Fig. 2.2 h). Por fim, o fluido de trabalho aquiesce e retorna à uma condição similar à observada na Fig. 2.2a, onde o calor fornecido no evaporador é armazenado em forma de energia interna na piscina do fluido de trabalho, até alcançar novamente uma condição metaestável e propiciar a formação de um novo ciclo do GB (Fig. 2.2i).

Figura 2.2–*Geyser Boiling* em um termossifão bifásico.



Fonte: Adaptada de Pabón (2019).

Durante o ciclo de GB em termossifões bifásicos, Pabón (2019) observou dois fatos importantes. O primeiro, é que a bolha formada durante o GB não necessariamente deve ocupar todo o diâmetro interno do termossifão para ser considerada uma bolha de GB. O segundo é sobre a baixa possibilidade de que líquido consiga atingir a extremidade do condensador.

O fenômeno de GB é influenciado por condições tanto construtivas quanto físicas às quais o dispositivo é submetido. Diversos fatores estão associados a geração do GB. Cisterna (2019) destaca os seguintes fatores: taxa de transferência de calor, coeficiente de transferência de calor externo ao condensador, razão de enchimento do termossifão (definido pela razão entre o volume do fluido de trabalho pelo volume do evaporador), razão de aspecto do tubo (definido pela razão entre o comprimento do tubo e o diâmetro interno do tubo), fluido de trabalho, pressão de operação, inclinação do tubo e comprimento das diversas seções do termossifão. Kempers e Elkholy (2020) apontam que parâmetros como material do tubo, tamanho do tubo e a presença de gases não condensáveis também influenciam na ocorrência do GB. As combinações desses fatores foram avaliadas em diversos trabalhos, como forma de verificar os aspectos preponderantes na formação do GB. A Tabela 2.1 apresenta um resumo de alguns parâmetros relacionados à ocorrência GB.

Tabela 2.1 – Parâmetros do termossifão que influencia no GB.

Parâmetro	Relação	Fluidos Estudados
Taxa de Transferência de calor	Aumentando-se a taxa de transferência de calor, aumenta-se a frequência do GB e diminui-se a amplitude até atingir uma taxa tal que o GB desaparece.	Água (ALAMMAR <i>et al.</i> , 2018), (XIA <i>et al.</i> , 2017); R134a (JOUHARA <i>et al.</i> , 2016), (LIU <i>et al.</i> , 2018); Sódio (CISTERNA, 2019).
Coeficiente de transferência de calor externo ao condensador	Khazae <i>et al.</i> (2010), observaram a diminuição da frequência das oscilações do GB com a diminuição do parâmetro.	Água (EMAMI <i>et al.</i> , 2009), (XIA <i>et al.</i> , 2017); Metanol (KHAZAE <i>et al.</i> , 2010).
Razão de aspecto	Diminuindo a razão de aspecto, diminui a frequência do GB.	Água (CHEN <i>et al.</i> , 2015); Metanol (KHAZAE <i>et al.</i> , 2010).
Razão de enchimento do termossifão	Aumentando-se a razão de enchimento, diminui-se a frequência do GB e aumenta-se a sua amplitude.	Água (KEMPERS e ELKHOLY, 2020); R134a (LIU <i>et al.</i> , 2018); Sódio (CISTERNA, 2019).
Pressão de operação	Aumentando-se a pressão de operação, aumenta-se a frequência do GB e diminui-se a sua amplitude.	Água (TONG <i>et al.</i> , 2015).
Inclinação do tubo	Reduzindo-se a inclinação, reduz-se o impacto na porção superior e diminui-se a intensidade do GB até atingir-se valores críticos de calor, que provocam a secagem do evaporador.	Água (ALAMMAR <i>et al.</i> , 2018), (EMAMI <i>et al.</i> , 2009); Sódio (CISTERNA, 2019), (Guo <i>et al.</i> , 2018).
Comprimento do evaporador	Aumentando-se o comprimento do evaporador, diminui-se a probabilidade de ocorrência de GB.	Água (ABREU <i>et al.</i> , 2003); Etanol (KEMPERS e ELKHOLY, 2020); Oxigênio líquido (MAO <i>et al.</i> , 2020).

Fonte: Adaptada de Cisterna(2019).

A partir dos parâmetros que influenciam o GB, Pabón *et al.* (2019) estudaram visualmente os efeitos da ebulição em um termossifão bifásico. O experimento foi estruturado em um tubo de vidro, com quatro fatores de enchimento e aquecimento pontual para favorecer a ocorrência do GB. Os autores analisaram a formação da bolha, o seu crescimento e a sua explosão. Eles observaram que a formação da bolha se dá em diferentes níveis de armazenamento de energia. Esse acúmulo de energia é responsável pelo início da nucleação e o crescimento da bolha. Eles observaram que a capacidade de armazenamento de energia pelo fluido de trabalho é fortemente influenciada pelo local onde ocorre a nucleação da bolha de vapor dentro da piscina. Quando a nucleação ocorre perto da superfície da piscina, as bolhas de vapor não conseguem se desenvolver completamente, liberando sua energia com menor intensidade.

Pabón *et al.* (2019) estudaram as condições de operação do termossifão preenchido com diferentes fatores de enchimento, observando que a diferença de pressão e o período de ebulição intermitente eram maiores para altas razões de enchimento. Pabón *et al.* (2019) definiram um critério para determinar a ocorrência do GB a partir de um número adimensional, dado pela equação:

$$N = \frac{\Delta P}{\bar{P}} \quad (2.1)$$

onde, ΔP representa a diferença de pressão entre duas leituras consecutivas do sensor de pressão e \bar{P} a pressão média para as condições do estado estacionário na condição de estudo. Os autores mostraram evidências do fenômeno de GB quando $N > 0,1$.

Chen *et al.* (2015) realizaram um estudo experimental para visualizar os efeitos do *Geyser Boiling* em um tubo vertical aquecido. Os autores analisaram o período e a amplitude do GB. Observaram uma associação entre o surgimento do fenômeno com uma temperatura crítica, isto é, uma temperatura maior que a temperatura de saturação a que o dispositivo estava submetido. Essa temperatura crítica para o GB se mostrou dependente de características inerentes do termossifão, como fluxo de calor, relação geométrica, pressão estática e outras condições do sistema. Para obter informações sobre o GB, Chen *et al.* (2015) utilizaram um número adimensional definido por Tong *et al.* (2014) como:

$$Ge^* = \frac{\Delta P^*}{\Delta T^*} \quad (2.2)$$

O número Ge^* é uma relação da diferença de pressão normalizada (ΔP^*) pela diferença temperatura normalizada (ΔT^*). A pressão normalizada é definida pelos autores como:

$$\Delta P^* = \frac{P - P_{sat}}{P_{sat} - P_0} \quad (2.3)$$

onde P corresponde a pressão registrada pelo sensor de pressão após a região de aquecimento, P_0 é a pressão registrada pelo sensor de pressão no início da região de aquecimento e P_{sat} a pressão saturação. A temperatura normalizada é definida como:

$$\Delta T^* = \frac{T - T_{sat}}{T_{sat} - T_0} \quad (2.4)$$

onde T corresponde à temperatura de parede registrada após a região de aquecimento, T_0 é a temperatura registrada no início da região de aquecimento e T_{sat} a temperatura de saturação. Os autores observaram também uma relação do período e amplitude do GB com a taxa de fluxo de calor, na qual, o aumento do fluxo de calor implicou na diminuição da amplitude de temperatura e período do GB.

Khazaei, Hosseini e Noie (2010) investigaram experimentalmente, em um termosifão de vidro, os efeitos da razão de enchimento, taxa de escoamento mássico do fluido de trabalho, razão de aspecto e calor de entrada. O objetivo deste estudo foi investigar os efeitos das oscilações de temperatura das superfícies do evaporador e do condensador em termos de magnitude e período. Esses dois termos são importantes como referenciais na determinação dos três regimes de ebulição definidos pelo autor: *Geysers Boiling* (marcado por altas oscilações no período e na temperatura), ebulição desenvolvida (caracterizado pela rápida geração de bolha e baixas oscilações no período e na temperatura) e ebulição em mistura (estado intermediário entre os outros regimes). Dos parâmetros investigados por Khazaei, Hosseini e Noie (2010), observou-se que o aumento da razão de enchimento de 35% para 65% implicou em um aumento do período de oscilação de 215 s para 260 s. A variação do fluxo de calor de entrada de 150 W para 200 W provocou uma diminuição do período de oscilação de 180 s para 125 s.

A diminuição da razão de aspecto de 28,6 para 17,2 implicou em um aumento do período de oscilação de 215 s para 255 s.

Kempers e Elkholy (2020) estudaram a performance térmica em termossifões e a influência dos seguintes parâmetros na ocorrência GB: fluxo de calor aplicado, fluido de trabalho, razão de enchimento e a área de superfície para o evaporador no termossifão bifásico. O dispositivo estudado é um loop termossifão no qual foram projetados três evaporadores com diferentes diâmetros hidráulicos. Dois fluidos de trabalho (água deionizada e etanol) foram empregados. O objetivo de usar diferentes configurações é compreender como a geometria em conjunto com o fluido de trabalho influenciam no *Geyser Boiling* e na performance térmica do dispositivo. Foram avaliados quatro fatores de enchimento: 11%, 17%, 28% e 38%. Os autores observaram que, para a razão de enchimento de 28%, o etanol apresentou uma performance superior à da água, para todos os níveis de potência, e uma resistência térmica 39% menor que a da água para uma potência de 20 W. Para potências maiores, foi observado que ambos os fluidos possuem praticamente os mesmos desempenhos. Para a razão de enchimento de 28%, foram observados maiores oscilações e frequências no etanol, enquanto o oposto ocorreu para as flutuações da temperatura do evaporador. Kempers e Elkholy (2020) observaram que a resistência térmica diminui com a diminuição da razão de enchimento. Outro fator que influencia na queda da resistência térmica é o aumento do fluxo térmico. Os autores observaram que a geometria do evaporador afeta o título do fluido na sua saída, alterando a performance hidráulica e o escoamento mássico do ciclo. Porém, verificam que as geometrias estudadas apresentaram uma mínima influência na resistência térmica do termossifão em altas razões de enchimento.

Alammar, Al-dadah e Mahmoud (2018) estudaram os efeitos da ocorrência do GB no desempenho térmico do termossifão bifásico em termos da distribuição de temperatura e resistência térmica. Os autores analisaram as características térmicas do termossifão (sendo o fluido de trabalho a água) antes e depois da ocorrência do GB para cada razão de enchimento testada (25%, 65% e 100%), cada ângulo de inclinação (90°, 60°, 30° e 10°) e cada potência testada (20 W – 400 W). Foi observada uma distribuição não-uniforme da temperatura no evaporador para baixos fluxos de calor, na orientação vertical e com pequena razão de enchimento. Esta não uniformidade da temperatura diminui com a diminuição do ângulo de inclinação e com o aumento da razão de enchimento. Depois que o GB acontece, uma distribuição uniforme da temperatura é obtida. Os autores observaram que a diminuição da temperatura do evaporador depende da orientação e fator de enchimento, onde a maior a

diminuição da temperatura foi alcançada para um fator de enchimento de 100% e ângulos de 90° e 30°. Foi observado também que a razão de enchimento de 100% apresenta maior resistência térmica antes da ocorrência do GB (ou seja, baixa taxa de transferência de calor), que diminui devido ao GB, resultando em uma significativa mudança na temperatura da parede do evaporador, ou seja, uma maior taxa de transferência de calor.

Jouhara, Fadhl e Wrobel (2016) realizaram uma modelagem tridimensional em *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para visualizar e prever o GB em um termosifão bifásico preenchido com água e com R134a. Os resultados simulados foram validados por meio de um termosifão de vidro. Eles observaram que a simulação CFD pode modelar o GB e que a taxa de transferência de calor tem um efeito considerável no surgimento e no desaparecimento do fenômeno.

Mao *et al.* (2020) realizaram uma análise numérica baseada no método dos volumes finitos para estudar a aparência e a intensidade do GB em um tubo vertical criogênico. Dois parâmetros adimensionais são propostos (intensidade de erupção e intensidade preenchimento) para descrever a amplitude do GB. Os autores observaram que quando a razão de aspecto é aumentada com o comprimento do tubo, a intensidade do GB aumenta continuamente devido a capacidade de armazenamento de energia. Quando a razão de aspecto é aumentada, diminuindo o diâmetro do tubo, a intensidade do GB aumenta inicialmente e depois diminui.

Niro e Beretta (1990) realizaram um estudo experimental e uma modelagem analítica dos mecanismos da ebulição em um termosifão bifásico para razões de enchimento médias e altas com objetivo de definir a fronteira entre os regimes de ebulição intermitente e plenamente desenvolvido. Os autores definiram, como critério para fronteira entre os regimes de ebulição, o tempo de espera da ebulição nucleada e o tempo de crescimento da bolha. Em seu modelo analítico, foi observado que esta fronteira ocorre quando o diâmetro da bolha é da ordem do diâmetro interno do dispositivo e quando o tempo de nucleação e o tempo de crescimento da bolha são da mesma ordem.

Jafari *et al.* (2017) investigaram experimentalmente e numericamente o comportamento de um termosifão bifásico que utiliza água como fluido de trabalho. Os autores avaliaram, para diferentes razões de enchimento (16% a 135%) e taxas de transferência de calor (30 W a 700 W) o regime de GB, o desempenho térmico do dispositivo, a resistência térmica e os coeficientes de transferência de calor de evaporação e condensação do termosifão. Os resultados mostraram que o dispositivo apresenta melhor desempenho térmico, para razões de enchimento menores que 35%, porém a possibilidade de secagem ou de ocorrência de GB aumentam. Para razões de enchimento de 35% e 135%, o dispositivo também pode operar no

regime de GB dependendo da taxa de transferência de calor. O modelo numérico desenvolvido pelos autores foi capaz de prever a transferência de calor e massa do dispositivo, além de mostrar que a secagem que ocorre no dispositivo representa uma transição para o regime estacionário.

Cisterna *et al.* (2020a) estudaram o termossifão bifásico de sódio e propuseram um modelo teórico para estimar os fluxos de calor mínimos necessários para entrar e sair da região do *Geyser Boiling*. Em seu estudo, foi definido um número adimensional denominado por “número de liberação de bolha” (φ_b) que corresponde a seguinte relação:

$$\varphi_b = \frac{\Delta T_w}{T_{sat}} \quad (2.5)$$

onde ΔT_w corresponde ao excesso de temperatura da parede do evaporador no sítio de nucleação (ou a temperatura do vapor no interior da bolha) e T_{sat} é temperatura de saturação do fluido de trabalho. Cisterna *et al.* (2020a), demonstraram que o número de liberação de bolhas está relacionado ao fluxo de calor mínimo necessário para a geração de bolhas com potencial de GB (q''_{GB_0}) e ao coeficiente de transferência de calor por ebulição (h_e), podendo ser expresso por:

$$\varphi_b = \frac{q''_{GB_0}}{h_e T_{sat}} \quad (2.6)$$

Cisterna *et al.* (2020a) observaram que o termossifão pode operar em sua região ideal sem ter que passar pela região do GB, bastando-se conhecer os valores mínimos da taxa de transferência de calor, que, na verdade, está relacionado ao número de liberação de bolha. Os autores constataram que, para um termossifão que utiliza sódio como fluido de trabalho, o dispositivo opera em condição ideal quando o número de liberação de bolha é menor que 0,01 ($\varphi_b < 0,01$) e em regime de GB quando o número de liberação é maior que 0,01 ($\varphi_b > 0,01$).

2.3 TERMOSSIFÕES COM DOIS FLUIDOS DE TRABALHO

Como mencionado anteriormente, um termossifão bifásico opera em um ciclo fechado de vaporização e condensação de uma certa quantidade de fluido de trabalho, a qual cumpre um papel fundamental para o bom funcionamento do dispositivo. Os trabalhos da literatura onde o

fenômeno de GB foi estudado ou reportado foram desenvolvidos em termosifões operando com um único fluido de trabalho. Contudo, existem algumas situações onde a utilização de mais de um fluido pode ser vantajosa.

De Beni *et al.* (1982) desenvolveram um dispositivo passivo semicontínuo com transporte de calor descendente, ou seja, evaporador acima do condensador, através da mudança de fase de um fluido misturado a outro fluido que não muda de fase. O fluido de trabalho que muda de fase é responsável pelo transporte de calor e um gás inerte contribui com a ação de retorno do fluido de trabalho. Nuntaphan *et al.* (2001) estudaram um termosifão bifásico, no qual utilizaram como fluidos trabalho amônia e água. Essas substâncias em mistura formaram um único fluido de trabalho. O emprego dessa mistura resultou em aumentos modestos na intensidade da transferência de calor. Duda, Dobrianski e Chludzinski (2018) desenvolveram um termosifão passivo que permite a transferência de calor quando o evaporador está acima do condensador. Este dispositivo é aplicado em instalações solares. Para realizar o transporte de calor, foram utilizados dois fluidos de trabalho: água e pentano, sendo a água responsável pelas trocas térmicas e o pentano, por apresentar baixo ponto de ebulição, atua como agente de bombeamento. A eficiência do transporte de calor no sistema estudado se mostrou similar a dispositivos com um único fluido.

Segundo Dobriansky e Wojcik (2019), existem pontos importantes que devem ser levados em consideração quando se opera com termosifões com mais de um fluido de trabalho, como ponto de ebulição, densidade, solubilidade, pressão, entre outros. Estes autores destacam três casos em que termosifões com dois fluidos podem ser empregados: quando o fluido de trabalho atua em conjunto com um gás inerte, na qual a pressão de vapor do fluido de trabalho atua associada à pressão do gás inerte. Outro caso é a utilização de dois fluidos solúveis, na qual a solução apresenta propriedades físicas desejadas herdadas de cada fluido de trabalho utilizado. E finalmente, no uso de dois fluidos insolúveis, na qual cada fluido realiza vários processos básicos independentes. Neste último caso, a utilização de dois fluidos de trabalho em termosifões pode se mostrar útil para o controle da geração do fenômeno de *Geyser Boiling*, onde um dos fluidos de trabalho é utilizado para o transporte do calor e massa (aumento de pressão no dispositivo) e o outro fluido com maior tensão superficial pode ser utilizado como agente controlador do GB.

É importante destacar que o fenômeno *Geyser Boiling* é habitualmente considerado como um fenômeno indesejado em termosifão, pois as oscilações de temperatura e pressão podem provocar falha do tubo. Contudo, existem algumas aplicações nas quais o fenômeno pode ser utilizado, como no desenvolvimento de bancadas de testes de fadiga termomecânica

(BOURE *et al.*, 1973; KAKAÇ e BONB, 2008), em coletores solares (Duda, Dobrianski e Chludzinski, 2018) ou em qualquer outro processo onde oscilações de temperatura e pressão são importantes. Nesses casos, o termossifão bifásico poderia proporcionar funcionamento similar ao de uma válvula de pressão do tipo *on-off*.

Esse trabalho tem como um dos objetivos, modelar teoricamente a amplitude e a frequência das oscilações de geradas pelo *Geysers Boiling* a partir da utilização de dois fluidos de trabalho em um termossifão bifásico. Pretende-se utilizar o fenômeno *Geysers Boiling* como uma válvula *on-off* periódica com amplitudes e frequências controladas. Ele deve ser útil no desenvolvimento de bancadas de fadiga termomecânicas em trocadores de calor compactos, onde é necessária a variação súbita, periódica e com amplitudes controladas de pressão e temperatura. O fluido utilizado neste trabalho foi a água destilada, que é responsável por realizar o ciclo termodinâmico entre o evaporador e o condensador, permitindo o transporte do calor e controle da temperatura de operação, misturada ao óleo térmico, que atua como agente controlador da amplitude e frequência do fenômeno de *Geysers Boiling*.

3 MODELO ANALÍTICO

Neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento das correlações que caracterizam os dois principais parâmetros que descrevem o fenômeno *Geysers Boiling*: amplitude (definida pelo número liberação de bolha) e frequência das oscilações geradas durante a liberação da bolha. Primeiramente, é apresentada a modelagem para a amplitude e, em seguida, a modelagem para a frequência de *Geysers Boiling*.

3.1 CORRELAÇÃO PARA AMPLITUDE DO *GEYSERS BOILING*

Para o desenvolvimento de uma correlação que permita determinar a amplitude das oscilações geradas pelo fenômeno de GB, é necessário primeiramente contar com uma correlação que descreva o comportamento do diâmetro de partida da bolha para diferentes condições de operação do termossifão. Segundo Cisterna *et al.* (2020a), a correlação proposta por Jensel e Memmel (1986, *apud* CAREY, 1992, p. 207) cumpre satisfatoriamente com esse objetivo, uma vez que relaciona os principais números adimensionais associados ao processo de ebulição nucleada em piscina com o diâmetro de partida da bolha (d_b), isto é:

$$Bo^{1/2} = 0,19(1,8 + 10^5 K_l)^{2/3} \quad (3.1)$$

onde:

$$K_l = \left(\frac{Ja}{Pr_l} \right) \left\{ \left[\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)}{\mu_l^2} \right] \left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{\frac{3}{2}} \right\}^{-1} \quad (3.2)$$

onde ρ_l , ρ_v , μ_l , σ e g representam, respectivamente, a massa específica na fase líquida, a massa específica na fase de vapor, a viscosidade dinâmica na fase líquida, a tensão superficial e a gravidade. Os termos Bo , Ja e Pr_l são, respectivamente, os números adimensionais de Bond (representado pela razão entre força de empuxo e tensão superficial), Jakob (representado pela razão entre a troca de calor sensível e troca de calor latente) e Prandtl (representado pela razão entre a difusividade de quantidade de movimento e a difusividade térmica) e são definidos como, respectivamente:

$$Bo = \frac{g(\rho_l - \rho_v)d_b^2}{\sigma} \quad (3.3)$$

$$Ja = \frac{\rho_l c_{pl}(T_e - T_v)}{\rho_v h_{lv}} \quad (3.4)$$

$$Pr_l = \frac{c_{pl}\mu_l}{k_l} \quad (3.5)$$

onde T_e é a temperatura da parede do evaporador, c_{pl} é o calor específico na fase líquida, h_{lv} é o calor latente de vaporização por unidade de massa e k_l a condutividade térmica na fase líquida.

Cisterna *et al.* (2020a) observaram que a equação obtida por Jensel e Memmel (1986, *apud* CAREY, 1992, p. 207) pode ser relacionada com o número adimensional denominado número de liberação de bolha (φ_b), que representa a temperatura de superaquecimento de parede (ΔT_w) necessária para liberação de uma bolha, a uma dada temperatura de saturação (T_v).

A partir das equações (2.5) e (3.1), Cisterna *et al.* (2020a) mostraram que é possível relacionar o número de liberação de bolha em função dos números adimensionais de Prandtl (Pr_l), confinamento (Co), e os números adimensionais corrigidos de Jakob (Ja_c), Bond (Bo_c) e Grashof (Gr_c). Assim, o número de liberação de bolha pode ser definido como:

$$\varphi_b = \frac{\Delta T_w}{T_v} = C_1 \frac{Co^{1,5} Pr_l Gr_c}{Bo_c^{1,44} Ja_c} \quad (3.6)$$

onde C_1 é uma constante para o número de liberação atribuída ao fluido de trabalho e os números adimensionais corrigidos de Jakob (Ja_c), Bond (Bo_c) e Grashof (Gr_c) são definidos, respectivamente, como:

$$Ja_c = \frac{\rho_l c_{pl} T_v}{\rho_v h_{lv}} \quad (3.7)$$

$$Bo_c = \frac{g(\rho_l - \rho_v)D_{int}^2}{\sigma} \quad (3.8)$$

$$Gr_c = \frac{\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_l} D_{int}^3}{\nu_l^2} \quad (3.9)$$

onde D_{int} é o diâmetro interno do termossifão e ν_l a viscosidade cinemática do líquido. O número de Grashof corrigido (Eq. 3.9) representa a razão entre força de empuxo e difusividade de quantidade de movimento. O número de confinamento (Co) é um número adimensional habitualmente utilizado para o estudo de GB em termossifões bifásicos (PABÓN *et al.*, 2019), o qual permite identificar o efeito do diâmetro interno do termossifão (D_{int}) e do diâmetro de partida da bolha (d_b) no fenômeno de GB. O número de confinamento é definido como:

$$Co = \frac{d_b}{D_{int}}, \quad (3.10)$$

Os resultados apresentados por Cisterna *et al.* (2020a) mostraram que o número de liberação de bolha apresenta um valor limite na ocorrência do fenômeno de GB. Estes autores mostraram que, para termossifões operando com sódio como fluido de trabalho, o fenômeno de GB acontecerá sempre que o número de liberação é maior que 0,01. Esse valor foi utilizado pelos autores para determinar a taxa de transferência de calor limite onde o termossifão opera no regime de GB.

É importante destacar que a correlação proposta por Cisterna *et al.* (2020a) (Eq. 3.6) não pode ser implementada diretamente para se determinar o superaquecimento de parede necessário para a liberação de uma bolha, independentemente do regime de operação do termossifão. Isto se deve ao fato de o número de liberação de bolha depender do diâmetro de partida de bolha (número de confinamento), o qual é desconhecido e só pode ser determinado a partir de dados experimentais. Para obter uma correlação do número de liberação de bolhas independente do diâmetro de partida de bolha, é necessário correlacionar o número de confinamento com outros parâmetros adimensionais, como Prandtl, Bond, Grashof e Jakob. Segundo os resultados experimentais obtidos neste trabalho, os quais serão apresentados em detalhes no Capítulo 4, o número de confinamento e, conseqüentemente, o diâmetro de partida da bolha, possui uma alta dependência do número de Jakob corrigido, de maneira que o número de confinamento pode ser definido como:

$$Co = \frac{a_1 J a_c^m}{(C_1)^{2/3}} \quad (3.11)$$

onde a_1 e m são as constantes de ajuste da correlação, as quais são determinadas a partir dos dados experimentais pelo método dos mínimos quadrados.

Assim, neste trabalho é proposta uma nova correlação para o número de liberação de bolha independente do diâmetro de partida da bolha, que permite determinar as amplitudes das oscilações da temperatura de operação do termossifão bifásico que opera no regime de GB. Esta correlação é dada por:

$$\varphi_b = \frac{\Delta T_w}{T_v} = a_1^{1,5} J a_c^m \frac{Pr_l Gr_c}{Bo_c^{1,44}} \quad (3.12)$$

3.2 CORRELAÇÃO PARA FREQUÊNCIA DO *GEYSER BOILING*

Para a determinação da frequência de ocorrência do GB em um termossifão bifásico, foram adaptadas diferentes correlações presentes na literatura, as quais apresentam em comum a dependência entre a frequência de liberação e o diâmetro de partida de uma bolha. Estas correlações, partem de diferentes mecanismos, como transferência de calor (Ivey, 1967; Mikic e Rohsenow, 1969), inércia (Ivey, 1967 e Cole, 1960) e convecção natural (Zuber, 1963).

Ivey (1967) mostrou que existe uma relação de dependência entre a frequência de liberação de bolha (f), o diâmetro de partida de bolha (d_b) e o mecanismo que domina o crescimento da bolha. Segundo o autor, os principais mecanismos são a inércia e a transferência de calor. Quando o crescimento da bolha é influenciado somente pela inércia, a frequência e o diâmetro de partida de bolha se relacionam através de uma constante (C_2), conforme expresso pela equação (3.13) da Tabela 3.1. Já quando o crescimento da bolha é dominado apenas pela transferência de calor, a frequência e o diâmetro de partida de bolha se relacionam através de outra constante (C_3), conforme expresso pela equação (3.14) da Tabela 3.1.

Cole (1960) sugeriu que, quando o crescimento de uma bolha é controlado pela inércia, a relação entre frequência e diâmetro de partida de bolha não apresentam valores constantes como a correlação de Ivey (1967), podendo ser expresso pela equação (3.15) da Tabela 3.1, onde C_d é o coeficiente de arrasto da bolha.

Mikic e Rohsenow (1969) mostraram que quando o crescimento da bolha é governado preferencialmente pela transferência de calor, a relação entre a frequência e o diâmetro de partida da bolha pode ser modelada pela equação (3.16) da Tabela 3.1, onde α_l representa a difusividade térmica na fase líquida.

Zuber (1963) sugeriu uma analogia entre o processo de liberação de bolha e a convecção natural, na qual a frequência de uma bolha é inversamente proporcional ao seu diâmetro de partida, sendo representada pela equação (3.17) da Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Correlações da literatura para frequência.

Modelos de Referência	Mecanismo	Modelos da literatura	
Ivey (1967)	Inércia	$f^2 d_b = C_2$	(3.13)
Ivey (1967)	Transferência de Calor	$f^{1/2} d_b = C_3$	(3.14)
Cole (1960)	Inércia	$f^2 d_b = \left(\frac{4}{3}\right) \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{C_d \rho_l}$	(3.15)
Mikic e Rohsenow (1969)	Transferência de Calor	$f^{1/2} d_b = 0,83 Ja \sqrt{\pi \alpha_l}$	(3.16)
Zuber (1963)	Convecção Natural	$f d_b = 0,59 \left[\frac{\sigma g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_l^2} \right]^{1/4}$	(3.17)

A grande dificuldade da utilização dos modelos propostos anteriormente para descrever o GB consiste na obtenção do diâmetro de partida. Na relação (Eq. 3.6) obtida por Cisterna *et al.* (2020a), é possível relacionar o número de liberação de bolha com o diâmetro de partida de bolha, através das Eqs. 3.6 e 3.10. Desta forma, ao relacionar essas equações e escrevendo o diâmetro de partida em função dos demais parâmetros, tem-se:

$$Co = \left[\frac{\varphi_b Bo^{1,44} Ja_c}{C_1 Pr_l Gr_c} \right]^{2/3} \quad (3.18)$$

$$d_b = D_{int} \left[\frac{Bo_c^{1,44} Ja_c \varphi_b}{C_1 Pr_l Gr_c} \right]^{2/3} \quad (3.19)$$

onde o diâmetro de partida depende do equilíbrio de forças entre o empuxo e a tensão superficial.

Assim, ao aplicar a Eq. 3.19 nas equações que relacionam a frequência de liberação de bolha com o diâmetro de partida de uma bolha (Eqs. 3.13 a 3.17), tem-se uma nova equação que relaciona a frequência de bolha com o número de liberação de bolha. Essas correlações são apresentadas na Tabela 3.2 e serão estudadas com maior detalhe no Capítulo 4.

Tabela 3.2 – Equações para a frequência em função do número de liberação de bolha.

Modelos de Referência	Mecanismo	Relações resultantes
Ivey (1967) e Cisterna <i>et al.</i> (2020)	Inércia	$f^3 \varphi_b = \frac{C}{D_{int}^{1,5}} \frac{Pr_l Gr_c}{Bo_c^{1,44} Ja_c} \quad (3.20)$
Ivey (1967) e Cisterna <i>et al.</i> (2020)	Transferência de Calor	$f^{3/4} \varphi_b = \frac{C}{D_{int}^{1,5}} \frac{Pr_l Gr_c}{Bo_c^{1,44} Ja_c} \quad (3.21)$
Cole (1960) e Cisterna <i>et al.</i> (2020)	Inércia	$f^3 \varphi_b = \left(\frac{1,54 \cdot 10^{-3}}{C_d^{1,5}} \right) \left[\frac{Pr_l Gr_c^{2,5}}{Bo_c^{1,44} Ja_c} \right] \left(\frac{v_l}{D_{int}^2} \right)^3 \quad (3.22)$
Mikic e Rohsenow (1969) e Cisterna <i>et al.</i> (2020)	Transferência de Calor	$f^{-1,5} \varphi_b = \left(\frac{1,75 \cdot 10^6}{\pi^{3/2}} \right) \left[\frac{Bo_c^{2,88}}{Pr_l^2 Gr_c^2 Ja_c} \right] \left(\frac{\alpha_l}{D_{int}^2} \right)^{-1,5} \quad (3.23)$
Zuber (1963) e Cisterna <i>et al.</i> (2020)	Convecção Natural	$f \varphi_b = 14,75 \frac{Gr_c^{0,5} Bo_c^{0,25}}{Ja_c} \left(\frac{v_l}{D_{int}^2} \right) \quad (3.24)$

4 ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO DOS TERMOSSIFÕES OPERANDO COM DOIS FLUIDOS DE TRABALHO

Nesse capítulo são apresentados a bancada experimental, a metodologia e os resultados obtidos para a investigação do fenômeno *Geysler Boiling* (GB) em termossifões bifásicos operando com dois fluidos de trabalho.

Essa dissertação teve como objetivo estudar o desempenho do termossifão operando com dois fluidos de trabalho e a formação do GB em função da variação de temperatura de vapor do fluido principal, da taxa de transferência de calor inserida no evaporador, da condição de resfriamento do condensador e da razão de enchimento entre os dois fluidos de trabalho. Posteriormente, serão comparados os resultados experimentais da amplitude do GB caracterizada pelo número de liberação de bolha e a frequência do GB com os modelos analíticos apresentados no Capítulo 3.

Nesse estudo, os fluidos de trabalho escolhidos foram água destilada, responsável pelo transporte de calor, e óleo térmico comercial (LUBRAX UTILE OT32), que cumpre o papel de agente controlador do fenômeno *Geysler Boiling*. As propriedades físicas dos fluidos de trabalho estudados são apresentadas no Apêndice A. Maiores detalhes de cada um dos estudos experimentais são relatados a seguir.

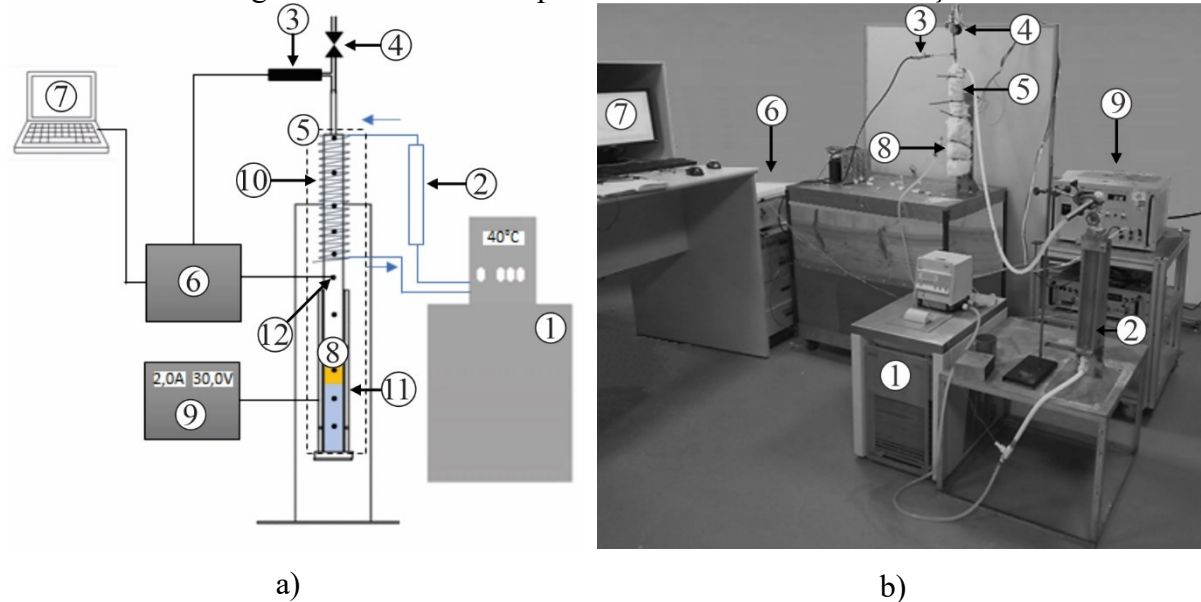
4.1 BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental utilizada para o estudo do desempenho térmico e da caracterização do fenômeno de GB em termossifões bifásicos operando com dois fluidos de trabalho foi montada a partir de: (1) banho térmico da marca LAUDA, modelo PROLINE RP 855, com controle de temperatura; (2) rotâmetro da marca Omega, modelo FL-1501A; (3) sensor de pressão; (4) válvula; (5) manta de isolamento térmico; (6) sistema de aquisição de dados; (7) computador; (8) termossifão bifásico; (9) fonte de alimentação; (10) serpentina de resfriamento fabricada a partir de um tubo de cobre; (11) Aquecedor meia calha; e (12) termopares do tipo K da marca Omega. A Fig. 4.1.a apresenta o diagrama da bancada experimental e a Fig. 4.1.b traz uma imagem da bancada experimental real.

O termossifão utilizado neste trabalho foi fabricado segundo a metodologia apresentada por Mantelli (2021). O material de invólucro utilizado foi aço inoxidável com comprimento total de 500 mm, onde os comprimentos do evaporador, seção adiabática e

condensador foram, respectivamente, 250 mm, 50 mm e 200 mm. O diâmetro externo do tubo foi de 25,4 mm com espessura de parede de 1,8 mm.

Figura 4.1 – Bancada experimental do termossifão de aço.



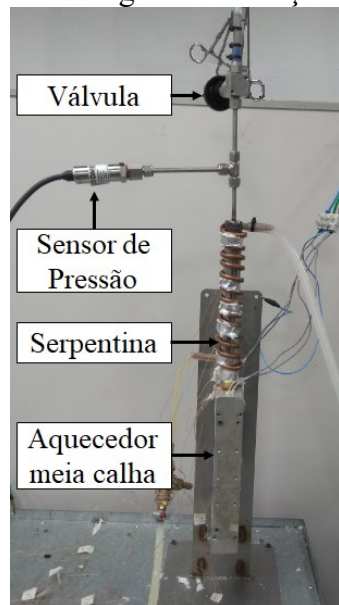
(1) Banho térmico; (2) Rotâmetro; (3) Sensor de pressão; (4) Válvula; (5) Manta de isolamento térmico; (6) Sistema de aquisição de dados; (7) Computador; (8) Termossifão; (9) Fonte de alimentação; (10) Serpentina; (11) Aquecedor meia calha; (12) Termopares.

O fornecimento de calor no evaporador foi realizado através de duas resistências cartucho de 35Ω , inseridas dentro de dois blocos de alumínio do tipo meia calha com o objetivo de distribuir de forma homogênea o calor ao longo do evaporador (Fig. 4.2.a). Para facilitar a troca térmica entre o termossifão e o aquecedor, foi utilizada pasta térmica de alta condutividade térmica, da marca Omegatherm® 201. As resistências foram conectadas em paralelo com uma fonte de alimentação da marca MCE, modelo 1310, com capacidade de fornecer uma potência nominal de até 3000 W. É importante destacar que, neste trabalho, foi considerado que o calor transferido pelos termossifões corresponde ao calor fornecido pela fonte de alimentação.

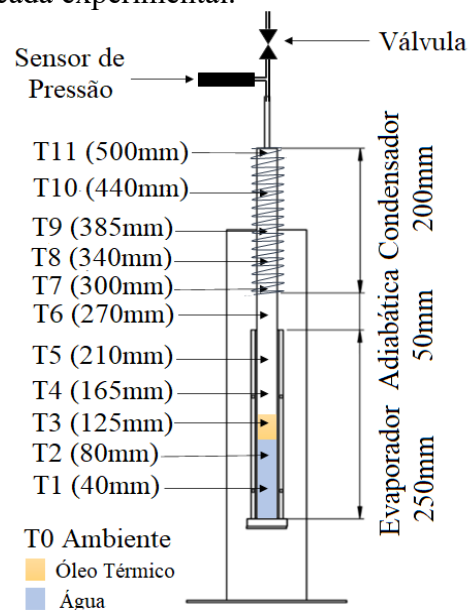
Um sensor de pressão da marca Omega, modelo PX409-050 AV foi instalado na parte superior do condensador (Fig. 4.2), com o objetivo de registrar a pressão interna no termossifão durante a operação e verificar a ocorrência do *Geysers Boiling* segundo a metodologia apresentada por Pabón *et al.* (2019), este componente é do tipo piezorresistivo sendo específico para intervalos de pressão de vácuo, seu tempo de resposta é inferior a 1 ms e sua faixa de medição vai de 0 bar a 3,4 bar (340 kPa).

O termossifão foi instrumentado com 14 termopares tipo “K” (cromel-alumel), de alta pureza e bitola AWG36, distribuídos ao longo do dispositivo da seguinte forma: 5 na seção do evaporador, 1 na seção adiabática, 5 na seção do condensador, 1 no ambiente, 1 na entrada da serpentina e 1 na saída da serpentina (Fig. 4.2.b). As medições foram realizadas através de um sistema de aquisição de dados da marca *Campbell Scientific*, a partir de um módulo CR1000 (com tempo de resposta 10 ms) e de um multiplexador AM25T (com tempo de reposta de 60 μ s). Para se minimizar os erros de medição, os termopares foram isolados com lã de vidro nos pontos de eventuais contatos com a resistência elétrica e a serpentina. Também, foi utilizada fita Kapton® para ajudar no isolamento elétrico e a montagem foi recoberta com fita de alumínio para evitar o aquecimento por radiação.

Figura 4.2 – Seção de teste da bancada experimental.



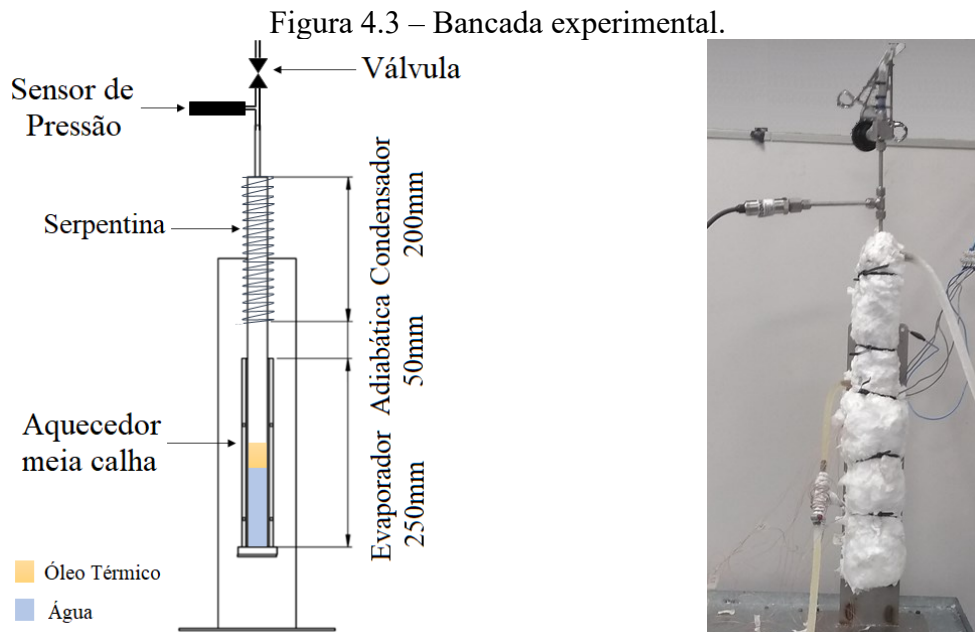
a) Bancada experimental sem isolamento.



b) Representação esquemática da posição dos termopares.

Para a dissipação do calor no condensador foi utilizada uma serpentina de cobre de 6,35 mm de diâmetro externo e 1 mm de espessura. O comprimento total da serpentina foi de 200 mm, distribuídos num total de 13 voltas ao redor do condensador (Fig. 4.2.a). No interior da serpentina de resfriamento foi circulado uma mistura de água destilada e álcool isopropílico em uma proporção volumétrica de 65% de álcool. O controle da vazão mássica e temperatura do fluido na serpentina foi feito através de um banho térmico da marca LAUDA, modelo PROLINE RP 855, com temperatura de operação entre -55°C e 200°C . Na linha de

alimentação da serpentina, foi instalado um rotâmetro da marca Omega, modelo FL – 1501A, com o objetivo medir a vazão do fluido de refrigeração. Finalmente, todas as seções do termossifão foram isoladas termicamente com lã de vidro, com condutividade térmica de $0,045 \text{ W / mK}$, como pode ser observado na Figura 4.3.



a) Representação esquemática do dispositivo, sem isolamento.

b) Bancada experimental.

4.2 METODOLOGIA

Neste estudo buscou-se a caracterização da amplitude e frequência do GB em função da variação dos seguintes parâmetros: razão entre os fatores de enchimento dos dois fluidos de trabalho, taxa de transferência de calor fornecida no evaporador e condições de resfriamento impostas no condensador. Para esse estudo foram adotados os procedimentos descritos a seguir.

4.2.1 Carregamento

O carregamento do termossifão com dois fluidos de trabalho foi realizado através das seguintes etapas:

- a) Limpeza: o tubo foi limpo com água, detergente, álcool isopropílico e acetona, segundo a metodologia proposta por Mantelli (2013);
- b) Desgaseificação e evacuação do tubo: o tubo foi colocado durante 1 hora numa bomba de anel líquido, modelo BVMII-156/60, com o objetivo de retirar as gotículas de líquido (como: água, álcool isopropílico e acetona) provenientes da limpeza do termossifão. Além disso, este processo serve de pré-vácuo, onde se consegue atingir pressões absolutas na ordem de 10^{-3} mbar. Posteriormente é realizado um vácuo de melhor qualidade em um sistema de bombas de alto vácuo. Neste sistema, o vácuo é feito por duas bombas, uma mecânica e uma difusora. A bomba mecânica, da marca Franklin Electric, modelo 1201006405, é responsável por um vácuo primário, da ordem de 10^{-4} mbar. Ao atingir esse vácuo, a bomba mecânica é desligada e a bomba difusora, modelo Edwards Diffstak 160 MM, entra em operação. A bomba difusora consegue estabelecer vácuos da ordem de 10^{-6} mbar. O vácuo é monitorado por dois sensores, de baixo e alto vácuo, modelos Edwards APG-M-NW16 e AIM-S-NW25, respectivamente.
- c) Desgaseificação dos fluidos de trabalho: primeiramente os fluidos de trabalho foram colocados em duas buretas graduadas e independentes, as quais foram conectadas a uma bomba de anel líquido com o objetivo de retirar os gases ou vapores presentes nos fluidos de trabalho.
- d) Carregamento: após a desgaseificação dos fluidos de trabalho, as buretas foram conectadas ao tubo com mangueiras de silicone, seguindo o procedimento de carregamento por vácuo apresentado por Mantelli (2013). Primeiro é carregado o tubo com o fluido de trabalho primário, isto é, a água destilada, e posteriormente é inserido o fluido secundário, isto é, o óleo térmico. É importante destacar que durante todo o procedimento de carregamento o vácuo no tubo é mantido aos níveis obtidos no sistema de bombas de alto vácuo. A Tabela 4.1 apresenta as quantidades de cada fluido inserida no tubo (F_1 para o fluido primário e F_2 para o fluido secundário), ou seja, o fator de enchimento, definido como a razão entre os volumes do fluido inserido e o volume interno do evaporador (isto é, a quantidade que o fluido inserido ocupa do volume do evaporador sendo representado em porcentagem em relação a esse volume).

Tabela 4.1 – Razões de enchimento para o termossifão de aço inoxidável.

Termossifão	Água destilada (F_1)	Óleo térmico (F_2)	F_2/F_1
Termossifão 1	$F_1=100\%$ (93 ml)	$F_2=0\%$ (0 ml)	0
Termossifão 2	$F_1=60\%$ (56 ml)	$F_2=0\%$ (0 ml)	0
Termossifão 3	$F_1=60\%$ (56 ml)	$F_2=40\%$ (37 ml)	0,667
Termossifão 4	$F_1=60\%$ (56 ml)	$F_2=30\%$ (28 ml)	0,5
Termossifão 5	$F_1=60\%$ (56 ml)	$F_2=20\%$ (19 ml)	0,333
Termossifão 6	$F_1=60\%$ (56 ml)	$F_2=10\%$ (9,5 ml)	0,167
Termossifão 7	$F_1=20\%$ (19 ml)	$F_1=20\%$ (19 ml)	1

4.2.2 Procedimento experimental

Foram testadas 7 razões entre os fatores de enchimento do fluido secundário e primário, visando caracterizar a amplitude e frequência de partida de bolha do fenômeno de GB. Para cada uma destas combinações de fatores de enchimentos, foram testadas três taxas de transferência de calor diferentes fornecidas no evaporador (20 W, 60 W e 100 W). Além disso, foram testadas três temperaturas de entrada na serpentina de resfriamento do condensador (40 °C, 10 °C e -10 °C). A vazão mássica do fluido de refrigeração na serpentina foi mantida em 0,02035 kg/s, de maneira a manter em todos os casos estudados, uma diferença de temperatura menor que 1 °C entre a entrada e a saída deste fluido da serpentina, criando assim uma condição de temperatura prescrita constante no condensador. Portanto, no total foram testadas 7 razões de fatores de enchimento, submetidas a 3 taxas de transferência de calor no evaporador e 3 condições de dissipação no condensador, contabilizando um total de 63 testes experimentais.

Os testes experimentais se iniciam com o dispositivo a temperatura ambiente, quando é imposta ao evaporador uma taxa de transferência de calor de 20 W, mantendo a temperatura de banho térmico de 40 °C. Quando o regime permanente é alcançado, a temperatura do banho térmico é alterada para 10 °C (mantendo a mesma taxa de transferência de calor). Novamente, após alcançado o regime permanente, a temperatura do banho térmico é alterada para -10 °C

(mantendo a taxa de transferência calor) e mantida nessa condição até se alcançar novamente o regime permanente, quando o teste é finalizado. Espera-se que o termossifão atinja novamente as condições de temperatura ambiente para recomençar um novo experimento com uma nova taxa de transferência calor imposta no evaporador. É importante destacar que os cálculos das incertezas de todas as medições experimentais desta dissertação estão resumidos no Apêndice B.

4.3 RESULTADOS PARA O TERMOSSIFÃO DE AÇO

Nesta seção, são apresentados os resultados do estudo experimental a respeito da formação do GB em um termossifão de aço operando com dois fluidos de trabalho. Na primeira parte é realizada uma caracterização do fenômeno de GB, e, posteriormente, são apresentados os resultados do desempenho térmico do dispositivo. Finalmente, são comparados os resultados experimentais da amplitude do GB caracterizada pelo número de liberação de bolha e a frequência do GB com os modelos analíticos apresentados no capítulo 3.

4.3.1 CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DE *GEYSER BOILING*

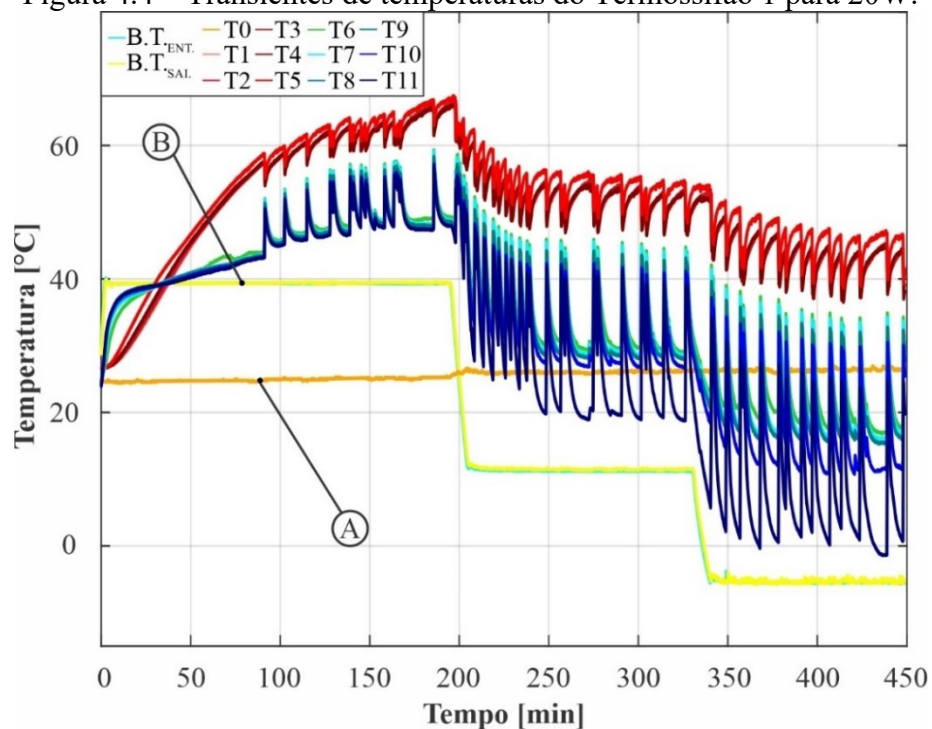
Para o estudo da caracterização do fenômeno de *Geysers Boiling* (GB) em termossifões bifásicos operando com um fluido (água) ou dois fluidos de trabalho (água e óleo), foram analisados os principais parâmetros que influenciam a formação, amplitude e frequência do GB, ou seja: a taxa de transferência de calor, condição de resfriamento do condensador (temperatura prescrita), pressão de operação e a razão de enchimento entre os fluidos de trabalho.

Com o intuito de descrever o fenômeno, na Figura 4.4 são apresentados os transientes de temperatura para cada uma das seções (evaporador, adiabática e condensador) de um termossifão que opera com 100% de água (Termossifão 1) a uma taxa de transferência de calor de 20W, as localizações de cada uma das temperaturas são apresentadas na Figura 4.2.b da seção 4.1.

O gráfico da Fig. 4.4 representa o comportamento do dispositivo durante a sua operação, inicialmente, o sistema encontra-se a uma temperatura ambiente (linha A na Fig. 4.4). Em seguida, uma condição de temperatura prescrita é estabelecida no condensador, essa temperatura é igual à 40°C sendo mantida constante até o regime permanente ser alcançado (essa temperatura é denominada por temperatura do banho térmico – BT sendo sinalizada pela linha B na Fig. 4.4). Depois da condição de resfriamento do condensador ter sido estabelecida

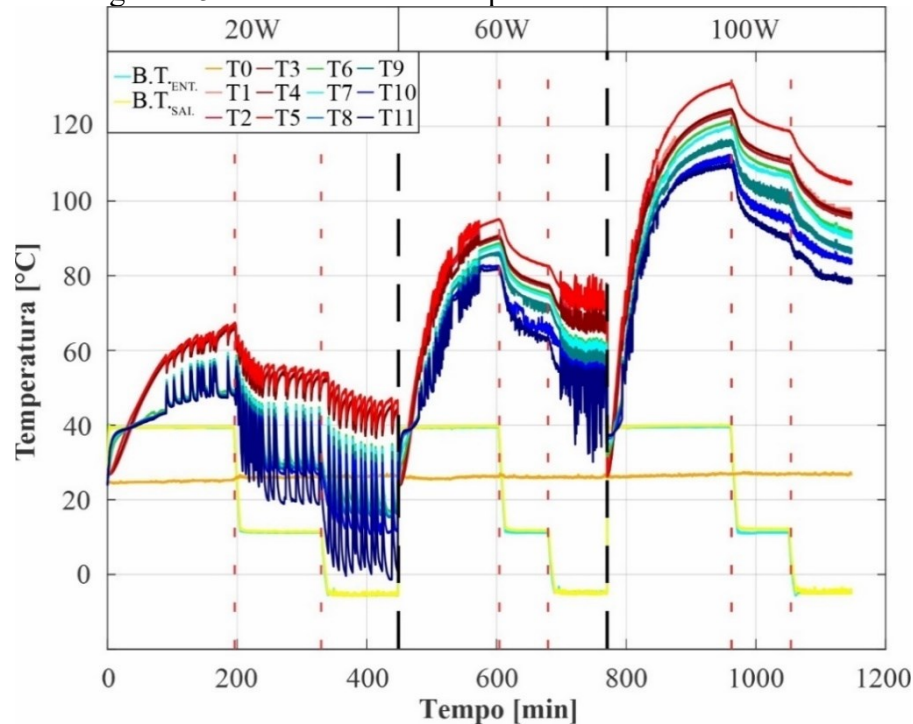
(40°C), uma taxa de transferência de calor de 20W é fornecida durante toda a operação do termossifão. Ao ser atingido o regime permanente, a temperatura do banho térmico é modificada para 10°C sendo mantida até ser alcançado um novo regime permanente, na qual, a temperatura é alterada novamente para -10°C encerrando o ciclo de operação até o novo regime permanente.

Figura 4.4 – Transientes de temperaturas do Termossifão 1 para 20W.



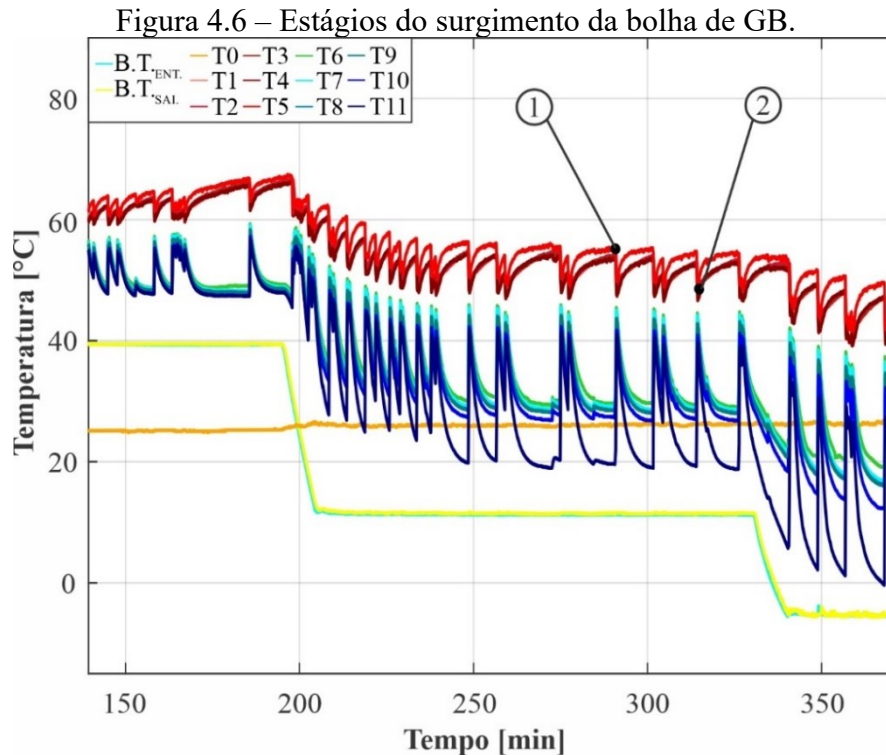
Esse ciclo de operação foi realizado para três diferentes taxas de transferência de calor para uma mesma razão de enchimento. Na Figura 4.5, são apresentados os transientes de temperaturas para o Termossifão 1, na qual, foi dividido em três níveis de taxa de transferência de calor (20 W, 60 W e 100 W) representadas por regiões separadas pelas linhas verticais tracejadas na cor preta. As regiões de cada um destes níveis de taxa de transferência de calor foram subdivididas em três sub-regiões, representadas por linhas verticais pontilhadas na cor vermelha, as quais correspondem às diferentes condições de resfriamento impostas no condensador do termossifão, onde as temperaturas que entra na serpentina utilizada para o resfriamento do condensador foram: 40°C, 10°C e -10°C.

Figura 4.5 – Transientes de temperaturas do Termossifão 1.



Na Figura 4.5, os transientes de temperaturas são marcados por oscilações cíclicas que ocorrem no evaporador e no condensador. Segundo Cisterna *et al.* (2020a) e Pabón *et al.* (2019), esse comportamento no termossifão é denominado por *Geysers Boiling*. Estes autores mencionam que durante a operação dos termossifões, no regime de GB, existe uma acentuada oscilação simétrica e simultânea da temperatura do evaporador e condensador. Isto é, quando se evidencia um aumento da temperatura do evaporador, no mesmo instante, ocorre uma diminuição na temperatura do condensador. Da mesma forma, quando se observa uma diminuição abrupta na temperatura do evaporador, se evidencia no mesmo instante um aumento súbito na temperatura do condensador. Isto ocorre quando a energia absorvida pela mudança de fase líquido-vapor é maior que o calor fornecido pelo termossifão, isto é, baixo fluxo de calor.

Esse comportamento da temperatura, na realidade, evidencia cada estágio do surgimento da bolha que dá origem ao GB: formação, crescimento e liberação. Segundo Pabón *et al.* (2019) o primeiro estágio, onde, a bolha se forma (Ponto 1 Fig. 4.6) é caracterizado pelo aumento considerável da energia interna na piscina de líquido, fazendo com que o fluido de trabalho alcance um alto nível de metaestabilidade. Uma pequena variação nas condições de contorno provoca a formação, crescimento e liberação da bolha, apontado no Ponto 2 da Fig.4.6 (segundo estágio).

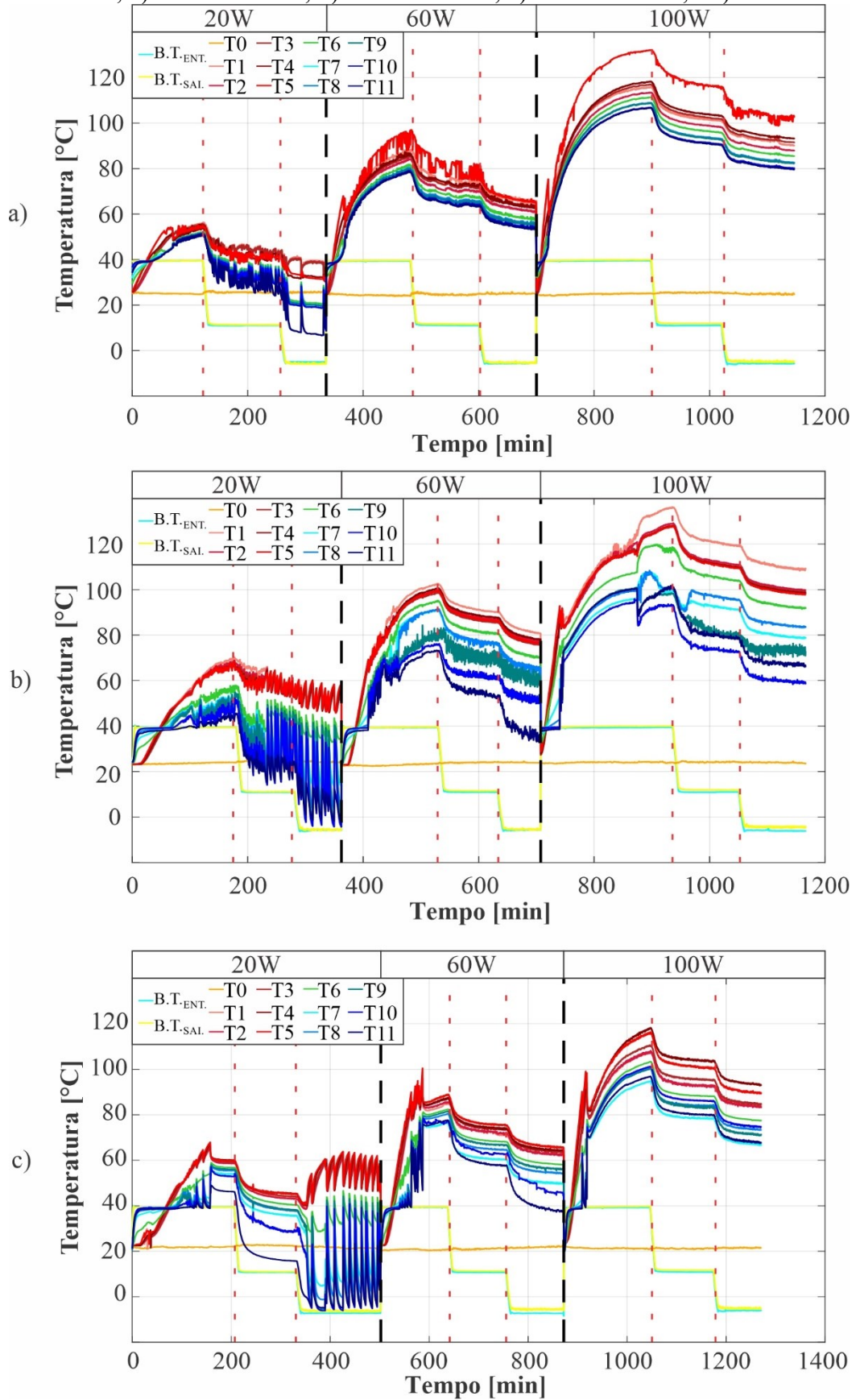


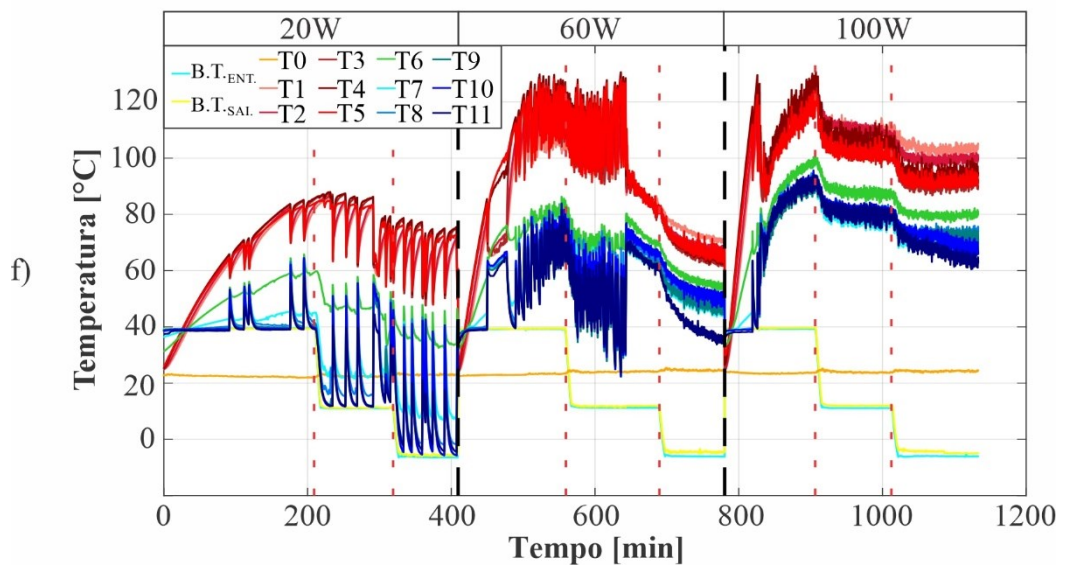
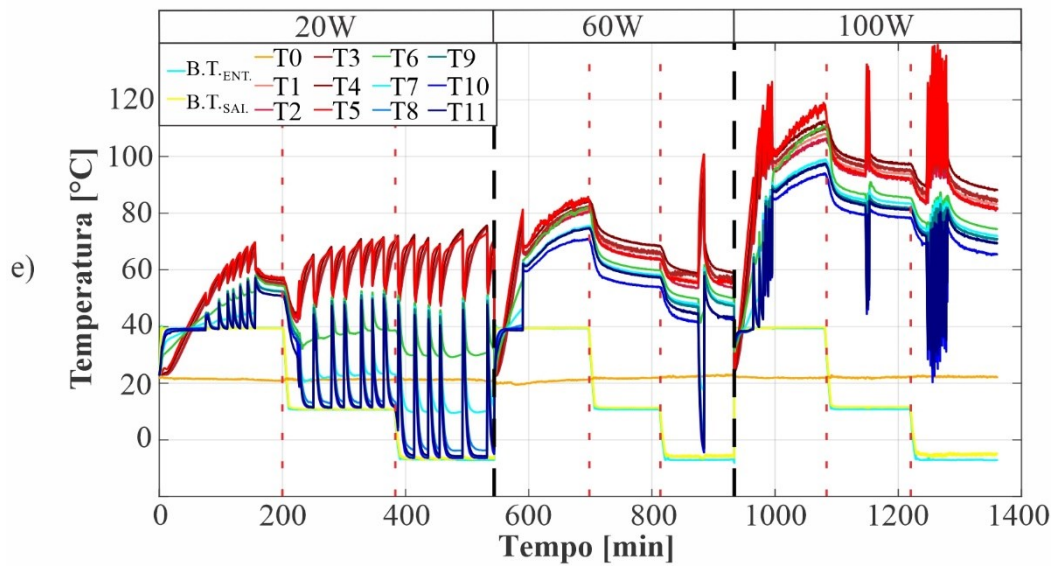
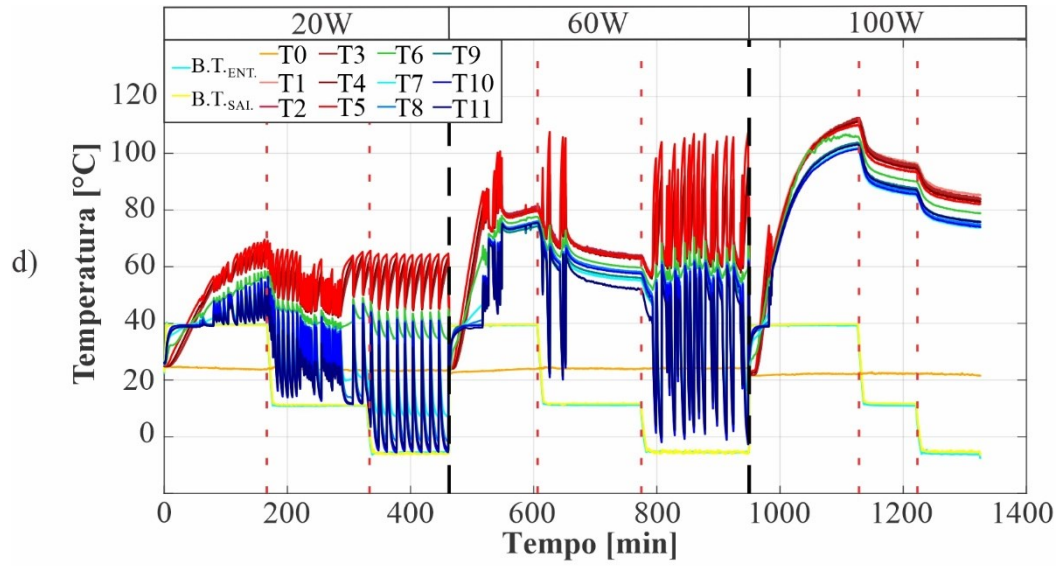
É importante destacar que, neste trabalho, a variação de temperatura originada pelo GB é definida como amplitude de *Geysers Boiling*, enquanto que o intervalo entre ocorrências do fenômeno, como a frequência de *Geysers Boiling*. Ambas estão associadas às condições em que o dispositivo é submetido (taxa de transferência de calor, condição de resfriamento e fator de enchimento).

Uma análise semelhante pode ser realizada para as demais proporções apresentadas na Figura 4.7. Nessa figura as demais razões de enchimento são esboçadas com o intuito de representar o comportamento desses dispositivos a diferentes taxas de transferência de calor (20 W, 60 W e 100 W) e distintas condições de temperaturas prescritas (40°C, 10°C, -10°C).

As oscilações das temperaturas do evaporador e condensador são mais fáceis de observar quando se trabalha com temperaturas médias, com mostrado nas Figs. 4.8.a até 4.14.a. Segundo Pabón *et al.* (2019), nem todas as oscilações observadas nas temperaturas do termossifão podem ser associadas ao fenômeno de GB. Estes autores apresentam um número adimensional (N), apresentado nas Figs. 4.8.b a 4.14.b, definido na equação (2.1) da seção (2.2), que indica que, quando existe uma oscilação na pressão interna do termossifão maior que 10% da pressão média registrada no regime permanente ($N > 0,1$), o dispositivo opera em regime de GB. Quando $N < 0,1$, as oscilações de pressão e temperatura são pequenas, e as bolhas de vapor liberadas no evaporador não possuem energia suficiente para serem consideradas de GB.

Figura 4.7 – Transientes de temperaturas dos termossifões estudados: (a) Termossifão 2; b) Termossifão 3; c) Termossifão 4; d) Termossifão 5; e) Termossifão 6; e f) Termossifão 7.





Outro parâmetro analisado para investigar a ocorrência do GB é o número adimensional de liberação de bolha, que representa o superaquecimento de parede necessário para a formação, crescimento e liberação de uma bolha geradora de GB com um dado diâmetro de partida e uma dada temperatura de saturação da piscina líquida (CISTERNA *et al.*, 2020a). Esse número adimensional é obtido experimentalmente a partir da temperatura de superaquecimento de parede e da temperatura de saturação do termossifão, como definido na equação (2.5) da seção (2.2). Os valores do número de liberação de bolha para os termossifões estudados neste trabalho são apresentados nas Figs. 4.8.c a 4.14.c. Segundo Cisterna *et al.* (2020a), em termossifões operando com sódio, quando a temperatura de superaquecimento de parede (ΔT_w) alcança 1% da temperatura de saturação, é possível considerar que o dispositivo opera no regime de *Geysers Boiling* ($\varphi_b > 0,01$).

Nos gráficos das Figuras 4.8 a 4.14, os transientes de temperaturas médias do termossifão, o número N , e o número de liberação de bolha são apresentados em gráficos em função do tempo, o que permite uma melhor comparação entre eles, facilitando a análise do fenômeno de GB. Os gráficos foram divididos em três distintas faixas que representam as taxas constantes de transferência de calor (20 W, 60 W e 100 W) e para cada faixa três regiões, representadas por linhas verticais pontilhadas em vermelho, correspondentes à temperatura de entrada da água de resfriamento da serpentina (40°C, 10°C e -10°C). A linha tracejada em vermelho na horizontal dos gráficos das Figuras 4.8.b a 4.14.b, indica o limite da ocorrência de GB, isto é, $N = 0,1$. A linha horizontal tracejada em vermelho das Figuras 4.8.c a 4.14.c, correspondem a duas regiões de operação distintas observadas nos dispositivos estudados. A primeira região ocorre quando o número de liberação é menor que 0,03 ($\varphi_b < 0,03$) e representa uma condição onde não ocorre GB, isto é, não foram observadas oscilações na temperatura e na pressão de operação características do fenômeno GB. Nesta primeira região, as bolhas formadas durante o superaquecimento de parede não apresentam energia suficiente para gerar o GB e o número de liberação é quase constante. Segundo Cisterna *et al.* (2020a), esse comportamento é característico de termossifões que operam em condições ideais de operação. A segunda região ocorre quando o número de liberação de bolha é maior que 0,03 ($\varphi_b > 0,03$). Nesta região, o dispositivo opera em regime de *Geysers Boiling*, evidenciado pelas grande amplitudes e baixas frequências da temperatura e pressão. A relação existente entre a frequências, o número de liberação de bolha e o fenômeno de GB serão mostrados com detalhes na seção 4.3.1.2.

Figura 4.8 – Transientes das temperaturas médias, número N e número de liberação de bolha do terrossifão 1.

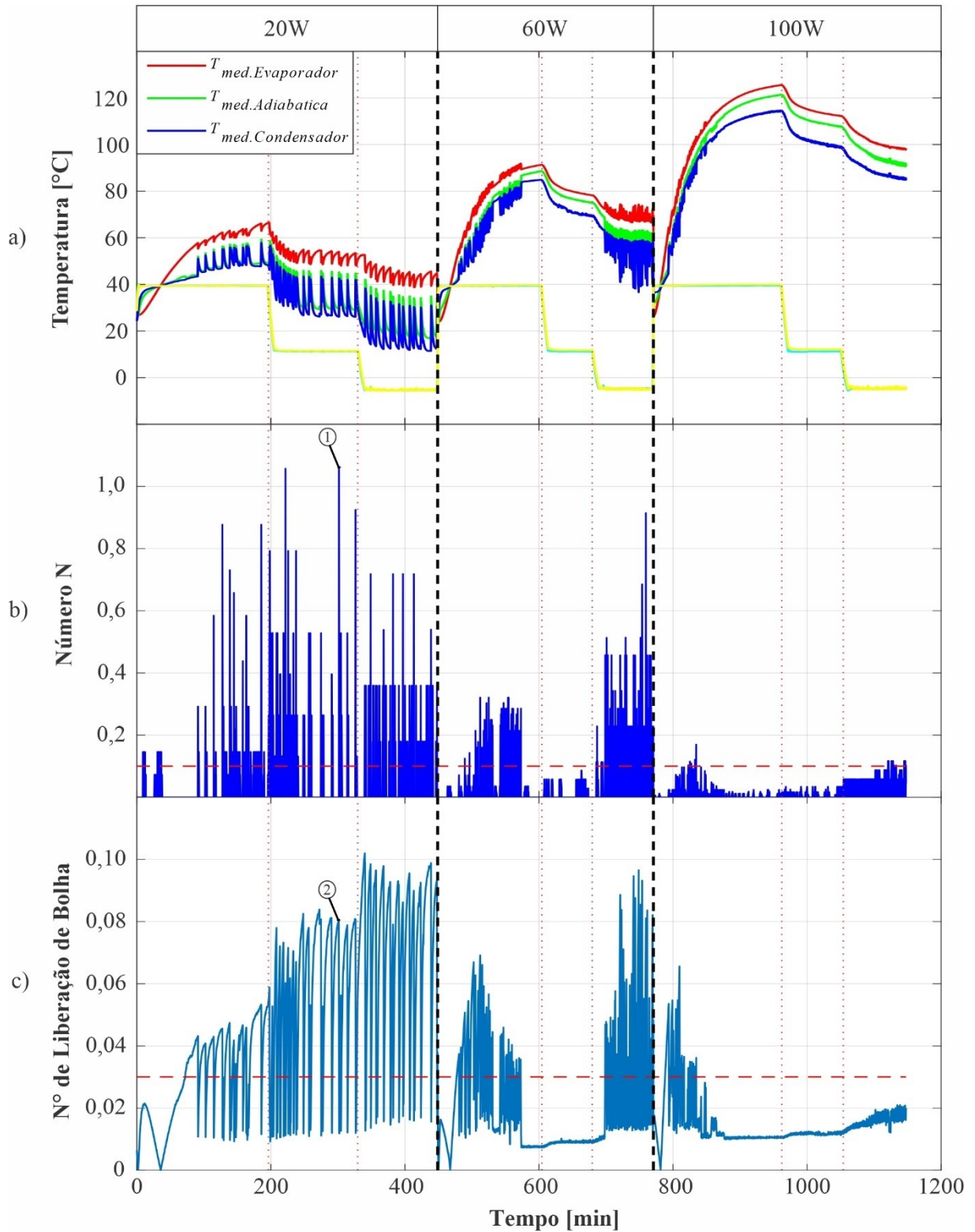


Figura 4.9 – Transientes das temperaturas médias, número N e número de liberação de bolha do termostato 2.

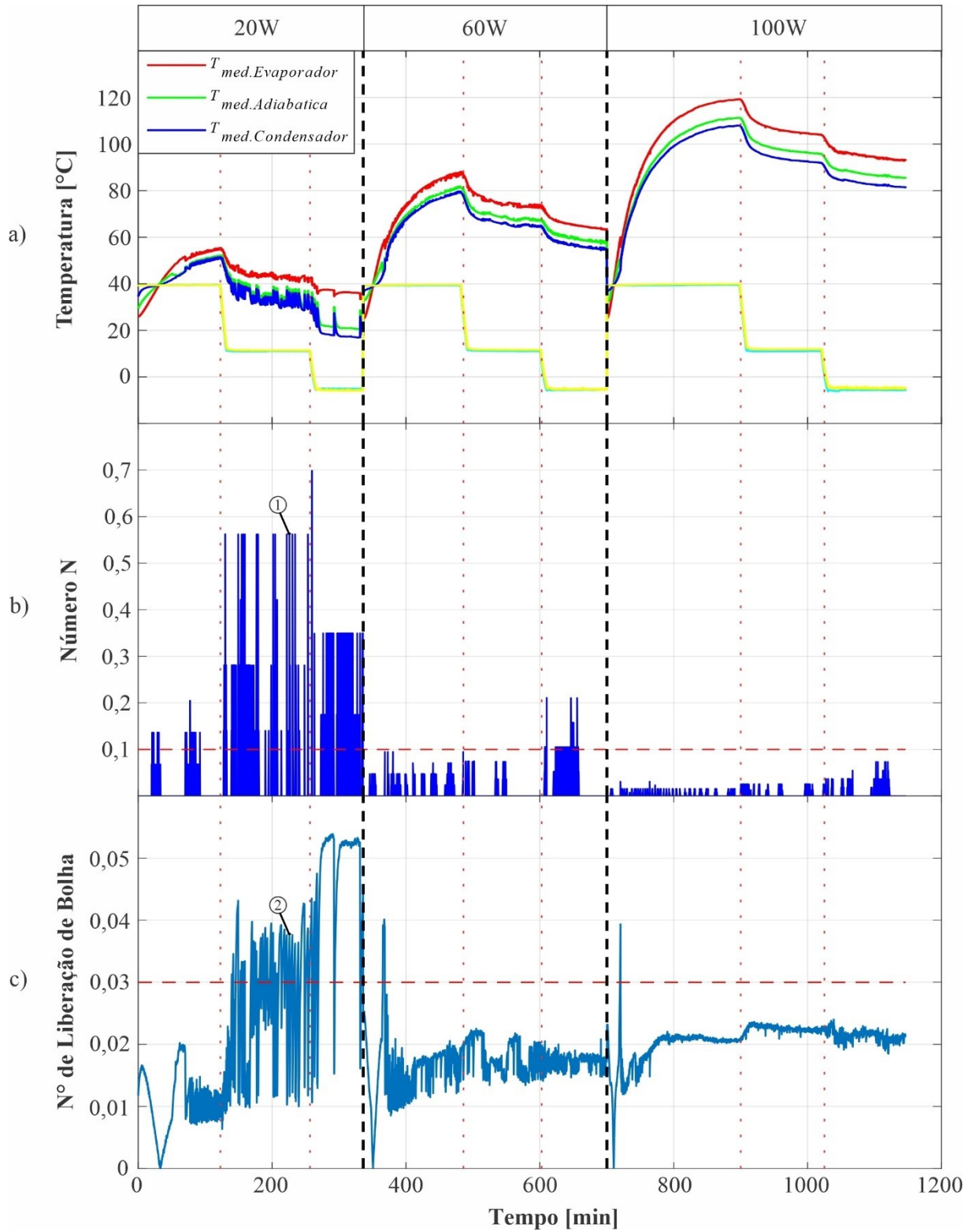


Figura 4.10 – Transientes das temperaturas médias, número N e número de liberação de bolha do termostato 3.

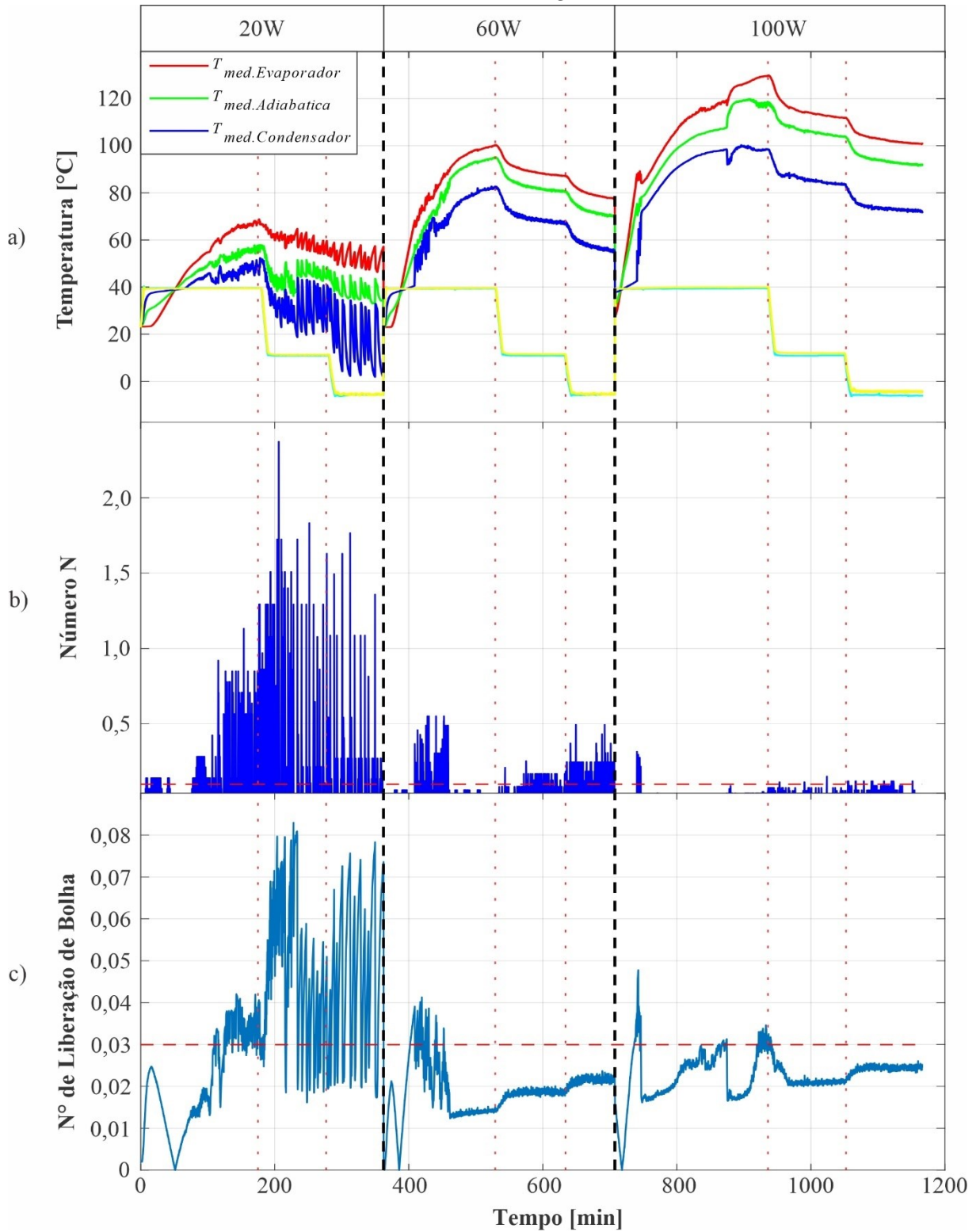


Figura 4.11 – Transientes das temperaturas média, número N e número de liberação de bolha do termossifão 4.

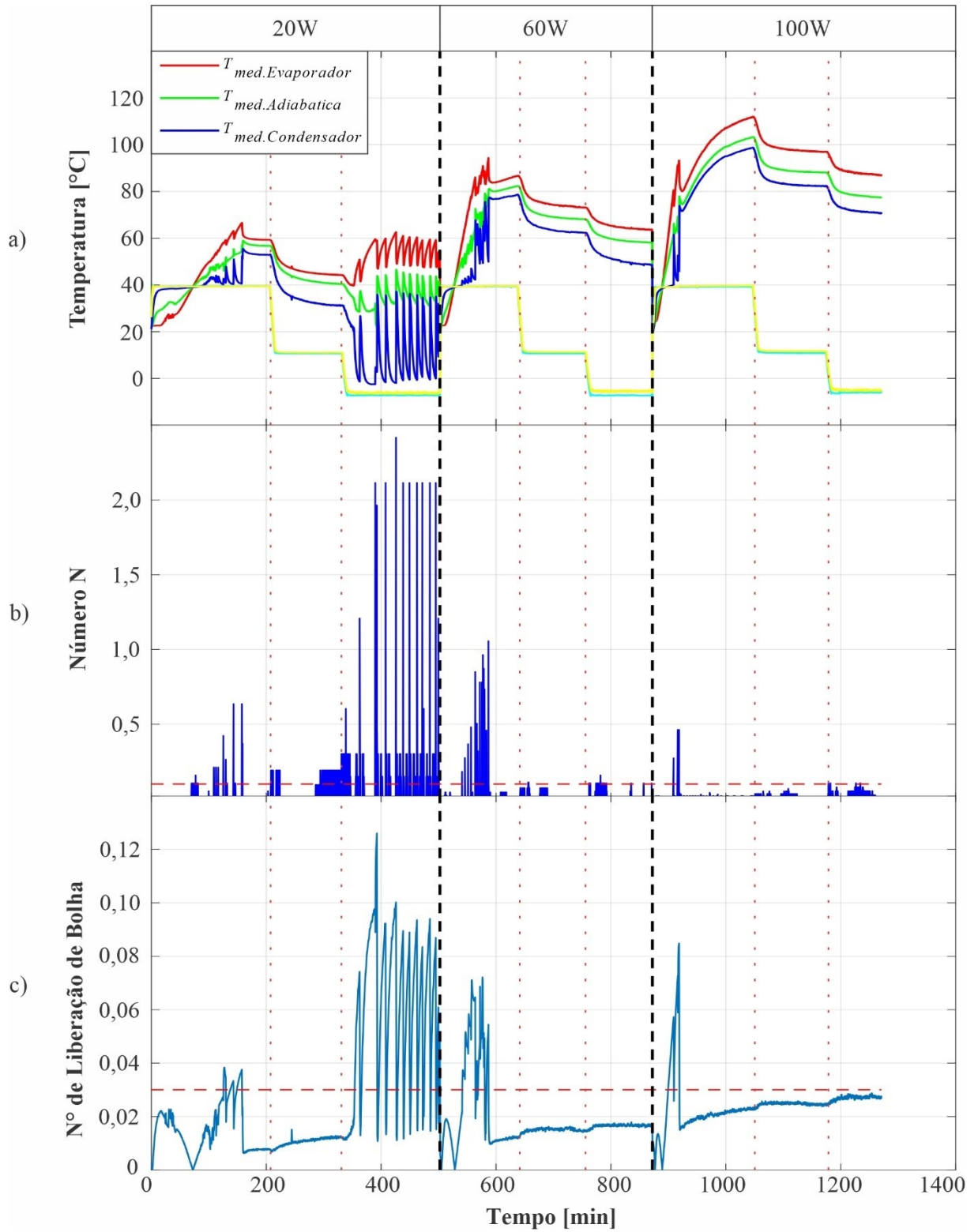


Figura 4.12 – Transientes das temperaturas médias, número N e número de liberação de bolha do termostato 5.

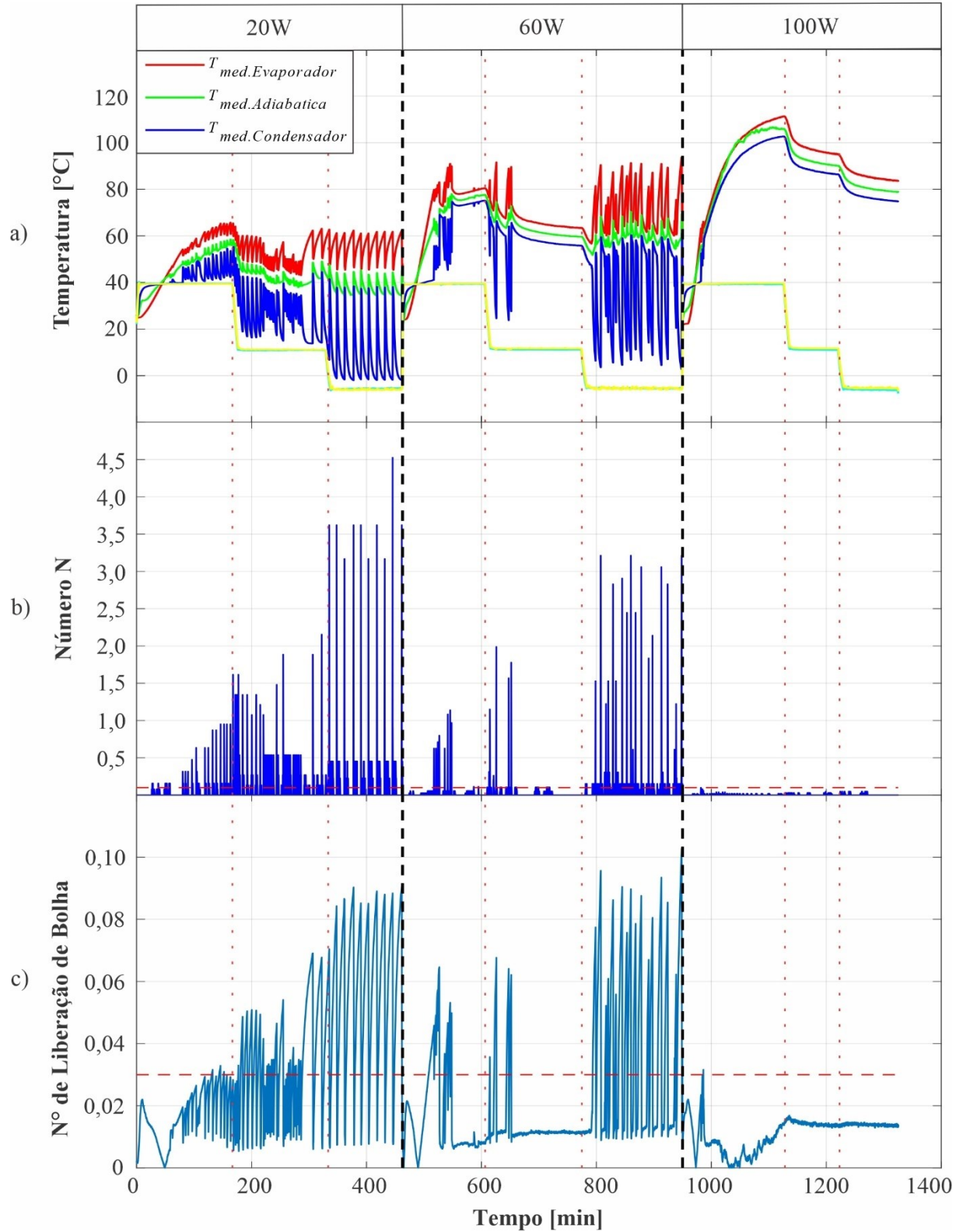


Figura 4.13 – Transientes das temperaturas médias, número N e número de liberação de bolha do termostato 6.

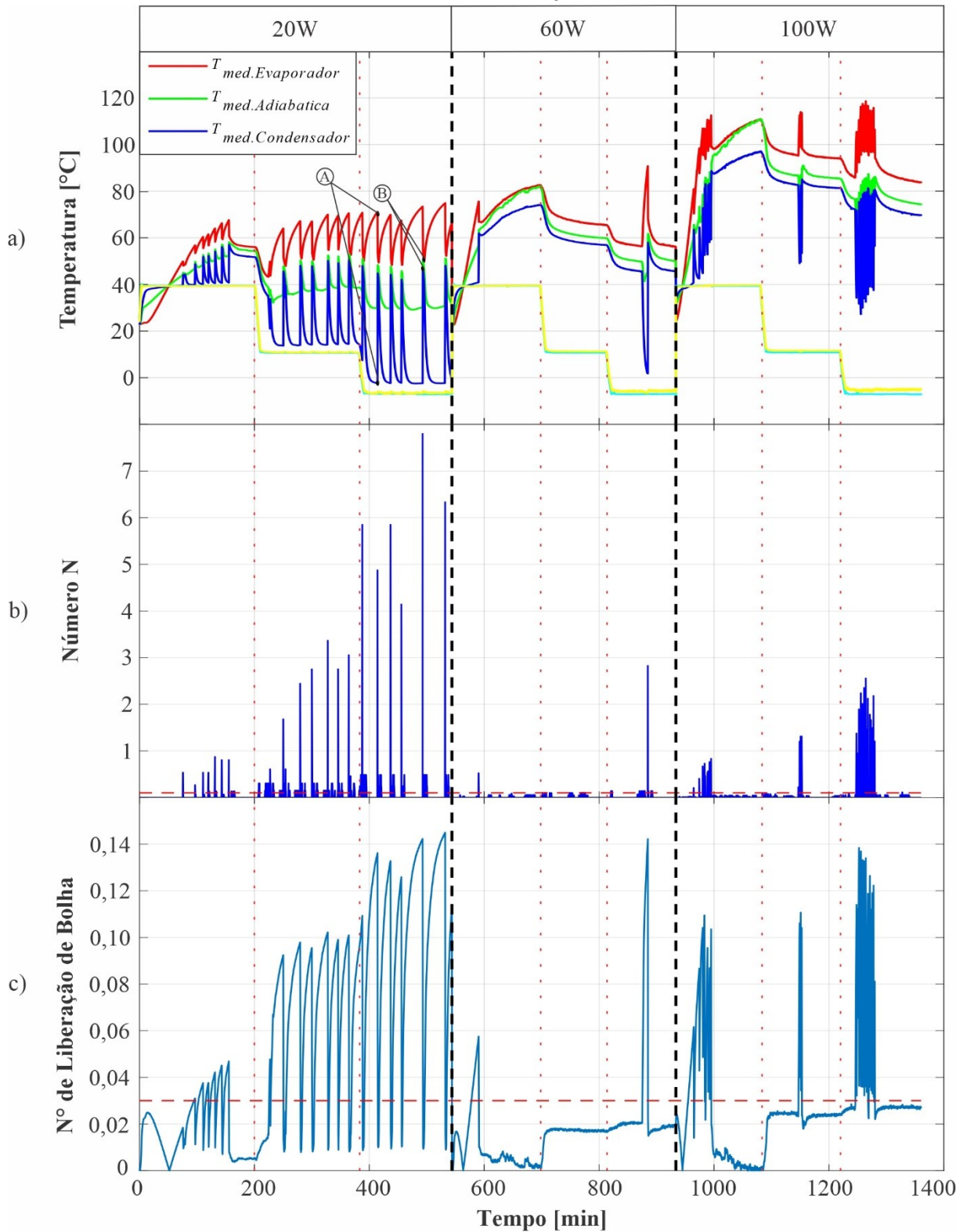
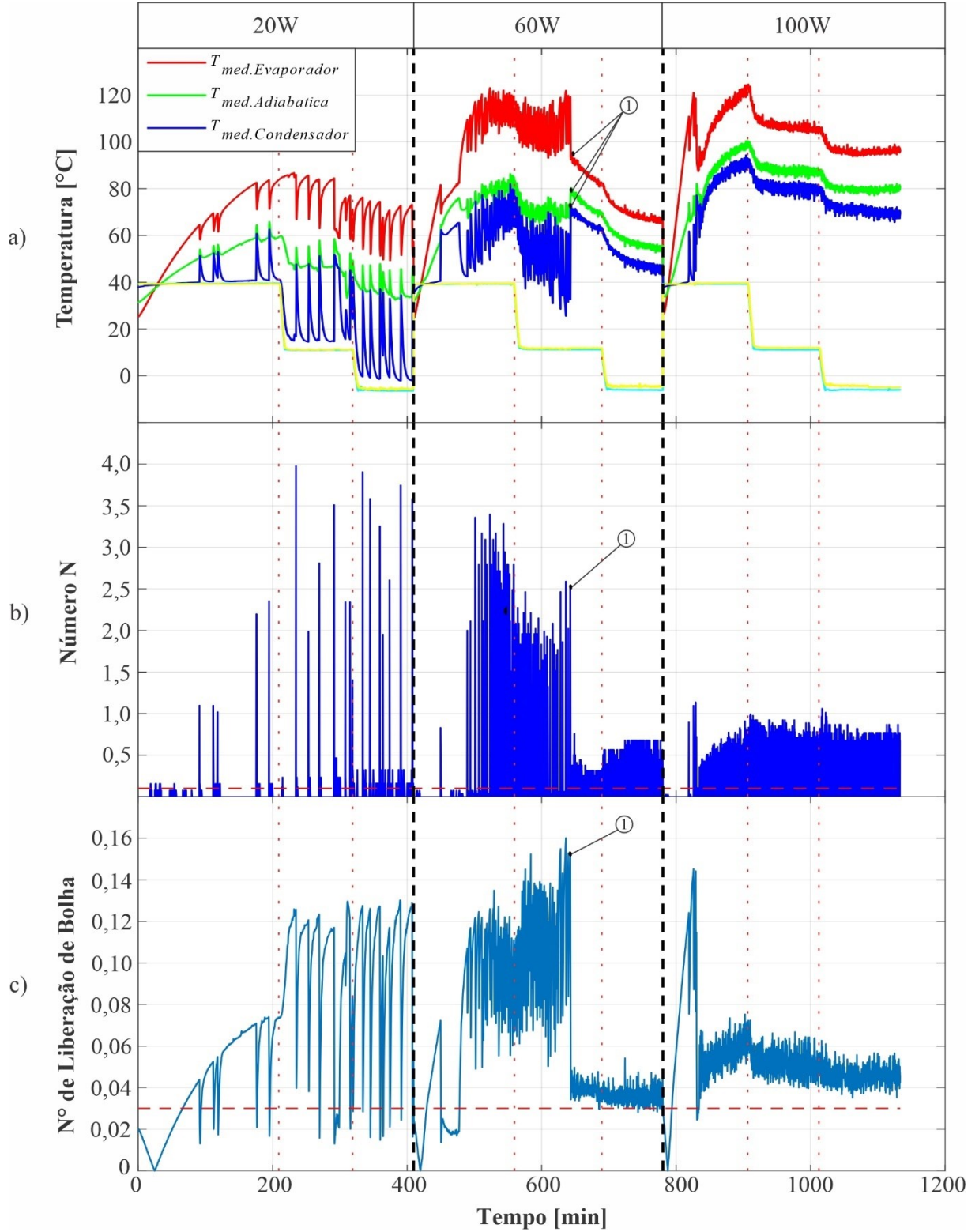


Figura 4.14 – Transientes das temperaturas médias, número N e número de liberação de bolha do termossifão 7.



4.3.1.1 Efeito da razão de enchimento em termossifões com um único fluido de trabalho.

Dos parâmetros estudados neste trabalho, a razão de enchimento é apontada na literatura como um dos principais parâmetros que influenciam a amplitude e a frequência do GB (Emami *et al*, 2009; Cisterna *et al* 2020a; Kempers e Elkholy, 2020). Neste trabalho, foi observado que, quando o dispositivo opera apenas com água como fluido de trabalho, o aumento da razão de enchimento proporciona um aumento da amplitude e uma diminuição da frequência do GB (o que pode estar associado a uma maior inércia térmica), como mostrado na Fig. 4.8 (fator de enchimento de 100% de água) e na Fig. 4.9 (fator de enchimento de 60% de água). Observa-se que as maiores oscilações da temperatura média do evaporador e condensador aconteceram em ambos os casos quando a taxa de transferência calor fornecida no evaporador foi de 20 W. Segundo o critério do número N , nesta taxa de transferência de calor ambos os termossifões operaram sempre no regime de GB, independentemente da condição de resfriamento. Observa-se que a amplitude máxima e a frequência mínima nestes termossifões aconteceram quando a temperatura de resfriamento foi de 10°C, onde o termossifão 1 apresentou um número N máximo de 1,06 e uma frequência mínima de 1,52 mHz, respectivamente (ponto 1 da Figura 4.8). No caso do termossifão 2, observou-se uma diminuição de 53% na amplitude do número N e um aumento de 280% na frequência de ocorrência do GB (ponto 1 da Figura 4.9) em relação ao termossifão 1, na mesma condição de operação.

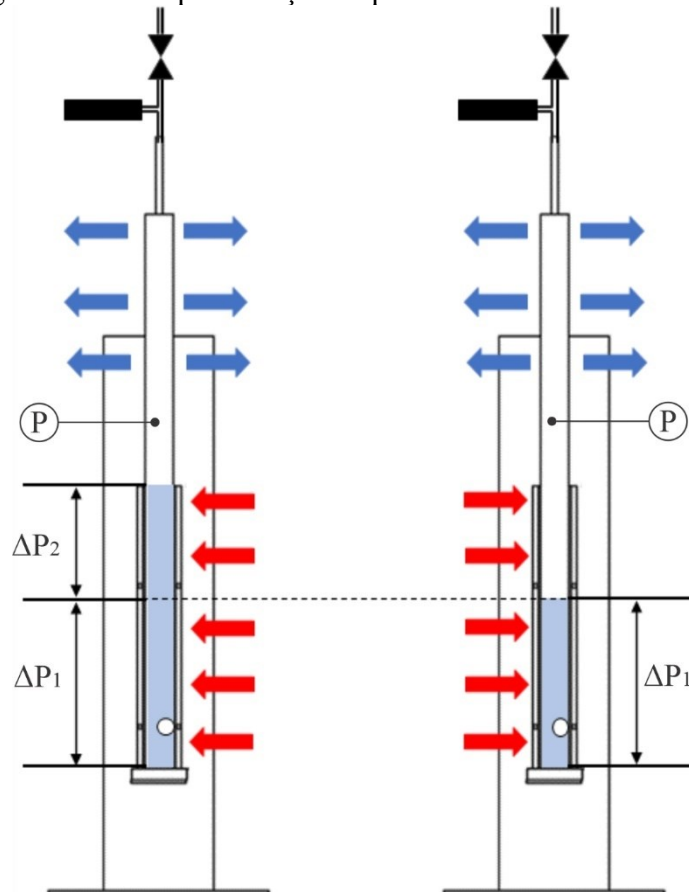
Segundo o critério do número de liberação de bolhas, quando a taxa de transferência calor foi de 20 W, o termossifão 1 sempre operou em regime de GB independentemente da condição de resfriamento no condensador. No caso do termossifão 2, o regime de GB foi evidenciado só quando as temperaturas de resfriamento foram de 10°C e -10°C. Em ambos os termossifões, as amplitudes do GB observadas para condição de resfriamento foram de 10°C, onde o termossifão 1 apresentou um número de liberação de bolha máximo 0,08 e uma frequência mínima de 1,52 mHz (ponto 2 Figura 4.8). No caso do termossifão 2, observou-se uma diminuição de 47% na amplitude do número de liberação de bolha e um aumento de 280% na frequência de ocorrência do GB (ponto 2 da Figura 4.9) em relação ao termossifão 1, na mesma condição de operação.

Desta forma, independentemente da análise realizada para avaliar a amplitude do GB (número N ou número de liberação de bolha), os resultados mostram concordância com a literatura (Kempers e Elkholy, 2020; Liu *et al.*, 2018; Jouhara *et al.*, 2016; Cisterna, 2019), o

que indica que quando se aumenta o fator de enchimento, a amplitude do GB aumenta e a frequência diminui.

Segundo Cisterna *et al.* (2020a), durante o processo de ebulição nucleada em piscina, a bolha que se forma num sítio de nucleação está submetida sob a ação de duas pressões principais: a pressão de saturação do termostifão e a pressão imposta pela coluna de líquido (fator de enchimento). No caso dos termostifões 1 e 2 (apresentados esquematicamente na Figura 4.15), quando a taxa de transferência de calor e a temperatura de saturação são iguais, a vazão mássica de vapor gerada em ambos os evaporadores é a mesma, independentemente do fator de enchimento.

Figura 4.15 – Representação esquemática dos termostifões 1 e 2.



Além disso, considerando que o diâmetro de partida da bolha seja função apenas do número de Bond, isto é, apenas da força de empuxo e a tensão superficial entre a bolha e a superfície do evaporador (ambas, independentes do fator de enchimento), é possível inferir que, quanto maior é o fator de enchimento, maior é a pressão hidrostática imposta pela piscina do

líquido. Consequentemente, maior é a pressão interna da bolha necessária para atingir o diâmetro de partida. Considerando que a pressão interna da bolha está diretamente associada à quantidade de vapor necessária para sua formação, é possível afirmar que quanto maior é o fator de enchimento, maior é a quantidade de vapor liberada por cada bolha. Consequentemente, as bolhas são liberadas com frequências menores, respeitando a primeira lei da termodinâmica (conservação da energia), o que concorda com os resultados mostrados nas Figuras 4.8.a e 4.9.a, onde se observa que as maiores amplitudes de GB, apresentam menores frequências.

4.3.1.2 Efeito da razão de enchimento em termossifões operando com dois fluidos de trabalho (água – óleo).

Quando o dispositivo opera com dois fluidos de trabalho (água destilada e óleo), observa-se um comportamento contrário ao observado com um único fluido de trabalho. O aumento do fator de enchimento do fluido secundário (óleo) proporciona uma redução da amplitude de GB e consequentemente um aumento na frequência do fenômeno, como pode ser observado nas Fig. 4.10 a Fig. 4.13. Em cada um destes termossifões, o fator de enchimento da água foi mantido a 60% e o fator de enchimento do óleo variou de 40% para o termossifão 3 (Fig. 4.10), 30% para o termossifão 4 (Fig. 4.11), 20% para o termossifão 5 (Fig. 4.12) e 10% para o termossifão 6 (Fig. 4.13).

Analisando apenas a condição onde todos os termossifões 3 a 6 operaram no regime de GB, isto é, quando a taxa de transferência de calor inserida no evaporador é de 20 W e a condição de resfriamento é mantida em -10°C , observa-se que o termossifão com menor razão de enchimento de óleo (termossifão 6) apresentou as maiores amplitudes de GB e, consequentemente, menores frequências de ocorrência. Isto também pode ser observado na Tabela 4.2, onde se mostram as amplitudes e frequências médias do GB, para o critério do número N e o critério do número de liberação de bolha (considerando a condição de estudo analisada). Assim, à medida que a proporção de óleo no termossifão aumenta, as amplitudes do GB diminuem e consequentemente as frequências de ocorrência do fenômeno aumentam. Estas observações são contrárias às relatadas na literatura e às apresentadas no termossifão 1 e 2 (sem óleo), onde o aumento do fator de enchimento é diretamente proporcional à amplitude do GB e inversamente proporcional à frequência do evento.

Tabela 4.2 – Número N médio, amplitude média de GB e frequência média de GB para uma mesma condição de operação.

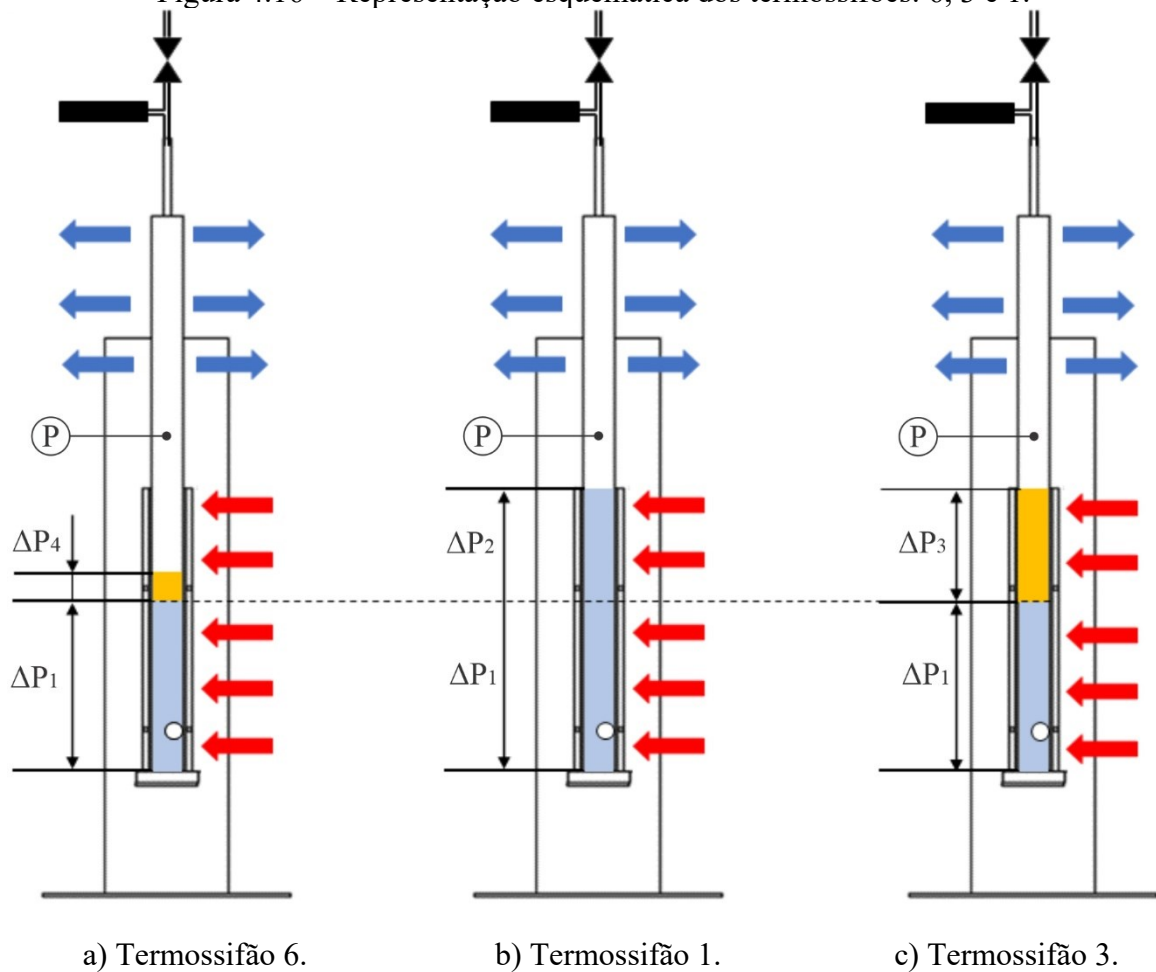
Termossifão	Número \bar{N}	Número de liberação de bolha ($\overline{\varphi_b}$)	Frequência (\bar{f})	Taxa de transferência de Calor	Temperatura de resfriamento
Termossifão 1	0,523	0,091	2,641 mHz	20 W	-10°C
Termossifão 2	0,350	0,053	0,423 mHz		
Termossifão 3	1,261	0,065	2,515 mHz		
Termossifão 4	2,130	0,091	1,458 mHz		
Termossifão 5	3,575	0,088	1,148 mHz		
Termossifão 6	5,817	0,134	0,594 mHz		
Termossifão 7	3,233	0,1219	1,279 mHz		

Com o objetivo de compreender melhor os efeitos provocados pela camada de óleo na amplitude e frequência do GB, dois casos extremos serão analisados: o termossifão 6 que possui uma camada de óleo de 10% do volume do evaporador e o termossifão 3 que possui uma camada de óleo de 40%. Ambos, serão comparados com o termossifão 1 que tem um fator de enchimento de 100% de água (Figura 4.16).

Considerando que os termossifões apresentados na Figura 4.16 se encontram na mesma condição de operação, isto é, taxa de transferência de calor, temperatura de resfriamento e temperatura de vapor iguais, a única condição que muda em cada um dos termossifões é a pressão hidrostática imposta à bolha no sítio de nucleação devido à coluna de líquido (fator de enchimento). Como mencionado anteriormente, se somente atuassem, durante o processo de formação, crescimento e liberação das bolhas, as pressões de saturação e hidrostática, maiores colunas de líquido levariam a maiores amplitudes do GB. Nesse contexto, espera-se que a amplitude do GB seja maior no termossifão 1 quando comparado com o termossifão 6, uma vez que a massa de fluido de trabalho imposta na bolha durante a formação é maior.

Contudo, os resultados apresentados nas Figuras 4.8 e 4.13, e na Tabela 4.2 para o caso de 20 W e -10°C, mostram que as amplitudes do número N observadas no termossifão 6 são aproximadamente onze vezes maiores que às observada no termossifão 1, mesmo que a pressão hidrostática no termossifão 1 seja maior que a do termossifão 6. Isto evidencia a existência de um novo efeito associado à camada de óleo, o qual tem maior contribuição na pressão externa da bolha durante sua formação, crescimento e liberação, que a própria pressão hidrostática.

Figura 4.16 – Representação esquemática dos termossifões: 6, 3 e 1.



Assim, pode-se considerar que a camada de óleo presente no termossifão 6, atua como uma membrana que dificulta a deformação do líquido que está sendo deslocado durante a formação e crescimento da bolha (aumento do volume da bolha), aumentando assim a pressão imposta na bolha durante o crescimento. Desta forma, para que o diâmetro de partida da bolha no sítio de nucleação possa ser mantido, é necessário maior quantidade de vapor no interior da bolha e conseqüentemente maiores amplitudes e menores frequência do fenômeno de GB. Presume-se que a membrana de óleo dificulta a evaporação da água na interface, implicando em temperaturas superiores na água e reduzindo o calor necessário para o crescimento e desprendimento de bolhas, causando um aumento na frequência quanto maior a camada de óleo.

Além disso, é possível observar que este “efeito membrana” diminui à medida que a camada de óleo colocada no termossifão aumenta. Isto é mostrado nos gráficos das Figuras 4.10 a 4.13, e na Tabela 4.2, onde se observa que, quanto maior é o fator de enchimento de óleo no termossifão, menor é a amplitude e maior é a frequência do GB. Comparando o termossifão 1 (100% água) com o termossifão 3 (60% água e 40% óleo) para o caso de 20W e 10°C, observa-

se uma divergência na análise das amplitudes de GB dependendo do critério utilizado. Quando se analisa o número N , observa-se que o termossifão 3 apresenta valores nas amplitudes do GB até 50% maiores que o termossifão 1, sugerindo que ainda o “efeito membrana” é significativo e maior que a própria pressão hidrostática. Quando se analisa os resultados através do critério do número de liberação de bolha, se observa que as amplitudes do GB apresentadas pelo termossifão 1 são aproximadamente 10% maiores que as apresentadas no termossifão 3, sugerindo que o “efeito membrana” já não é significativo, e que a partir desta proporção de fator de enchimento de óleo, o efeito gerado por este fluido de trabalho é preferencialmente associado à pressão hidrostática. Em ambos os critérios de avaliação do GB, se observa que as frequências do GB são praticamente iguais em ambos os termossifões na condição de operação analisada, o que pode sugerir uma condição de transição do comportamento da coluna de óleo, na qual deixa de se comportar como “membrana” e começa a se comportar exclusivamente como uma coluna de líquido que aporta apenas com a pressão hidrostática.

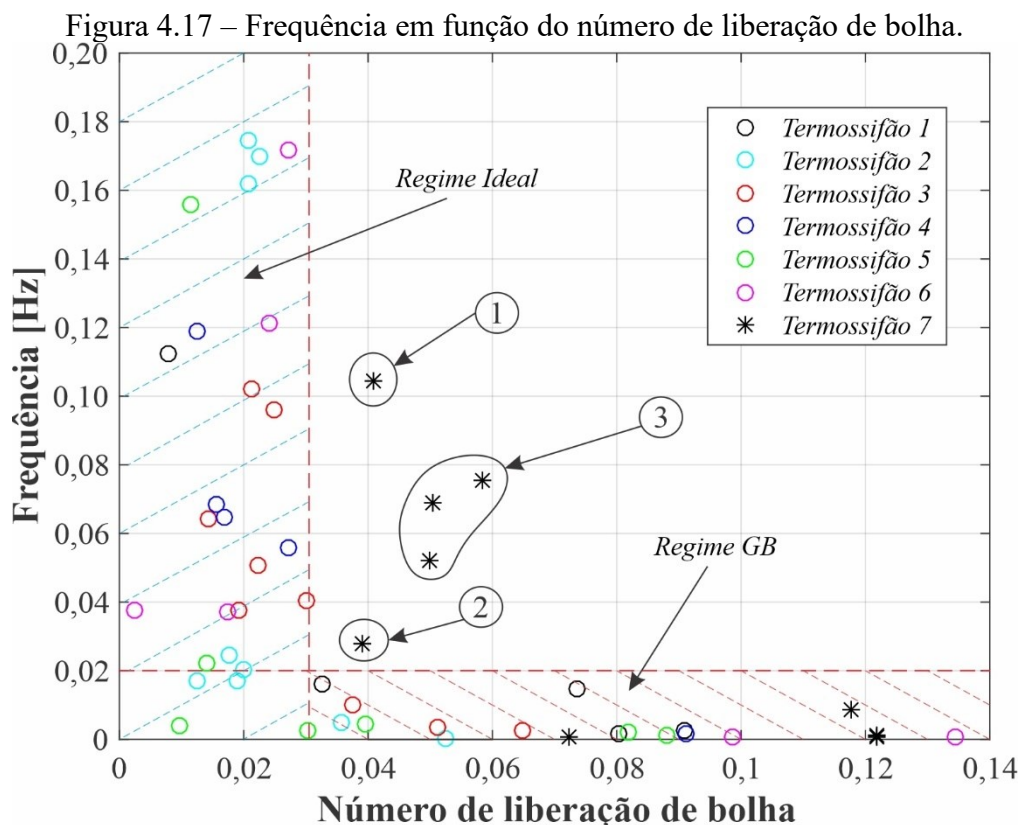
O mesmo caso anterior pode ser ainda sustentado no caso com taxa de transferência de calor de 60 W e temperatura de resfriamento de -10°C . Observa-se no termossifão 1 a existência de oscilações na temperatura do evaporador e do condensador que são associadas ao fenômeno de GB segundo o critério do número N e o número de liberação de bolha. No caso do termossifão 3, não foram observadas oscilações na temperatura do evaporador e condensador e nem o critério do número de liberação de bolha mostra a existência do GB. Contudo, o critério do número N mostra oscilações na pressão do termossifão 3 maiores que 10% e, portanto, podem ser consideradas como consequência do GB. Isto novamente mostra resultados contraditórios e que podem ser associados à existência de uma transição no comportamento da coluna de óleo, a qual deixa de se comportar como membrana e começa a se comportar exclusivamente como uma coluna de líquido que aporta apenas a pressão hidrostática.

O termossifão 7, com fator de enchimento de 20% água e 20% óleo, foi estudado para verificar se o “efeito membrana” pode ser amplificado através da diminuição do fator de enchimento de água no termossifão. Os resultados experimentais são apresentados na Fig. 4.14.

Comparando os resultados obtidos para o termossifão 7 com os resultados obtidos com o termossifão 5 (Figura 4.12) se observa que, quando a taxa de transferência calor inserida no evaporador foi igual a 20 W, independentemente da condição de resfriamento, as amplitudes do GB no termossifão 7 foram em média 10% maiores que as observadas no termossifão 5. Quando a taxa de transferência de calor foi de 60 W e a condição de resfriamento de 10°C , o termossifão 5 não apresentou GB, como se observa nos critérios do número N e o número de

liberação de bolha da Figura 4.12. No caso do termossifão 7, nesta mesma condição de operação, o fenômeno de GB foi evidente, com amplitudes maiores ainda às observadas quando o termossifão operava a taxas de transferência de calor de 20 W. Isto mostra que o “efeito membrana” observado por pequenas camadas de óleo é amplificado quando se utiliza baixas razões de enchimento do fluido primário, neste caso água.

Quando o termossifão 7 opera a 60 W e condição de resfriamento de 10°C e -10°C, e a 100 W em todas as condições de resfriamento (Figura 4.14), observa-se que, tanto o critério do número N como o critério do número de liberação de bolhas, apresentam valores nas amplitudes das oscilações maiores que os limites estabelecidos para serem considerados em regime ideal, isto é, o termossifão opera no regime de GB. Porém, é importante ressaltar que as frequências observadas nestes casos são muito maiores que as observadas em termossifões operando no regime de GB. O anterior pode ser observado na Fig. 4.17, onde se apresenta a frequência de liberação de bolha em função do número de liberação de bolha.



Na Fig. 4.17, observa-se que todos os termossifões que apresentaram números de liberação de bolha menores a 0,03 (regime ideal) apresentaram frequências na faixa de 0,005 Hz até 0,18 Hz, onde as variações dependem principalmente do fator de enchimento e

condições de operação. Quando o número de liberação de bolha foi maior que 0,03 (regime de GB), todos os termosifões apresentaram frequências menores a 0,02 Hz, com exceção do termosifão 7 operando com 60 W e condição de resfriamento de 10°C e -10°C (pontos 1 e 2 da Figura 4.17) e operando com 100 W para todas as condições de resfriamentos testadas (ponto 3 da Figura 4.17). Esta divergência nos resultados pode sugerir que na proporção 20% de água e 20% de óleo, quando a frequência de liberação de bolha aumenta, é produzida uma movimentação na piscina de água e óleo suficientemente grande, que mistura os fluidos e cria uma emulsão que se comporta como um fluido único com características de superaquecimento de parede maiores que as observadas por exemplo no termosifão 5 (60% água e 20% óleo).

4.3.1.3 Efeito do número de Reynolds no GB em termosifões.

Os resultados apresentados nas Figuras 4.8 a 4.14 mostram que a amplitude e frequência do GB são altamente influenciadas pela taxa de transferência de calor inserida no evaporador e da condição de resfriamento no condensador. Observa-se, para todos os casos estudados, que para uma mesma condição de temperatura imposta no condensador, o aumento da taxa de transferência de calor provoca uma diminuição da amplitude e um aumento na frequência de GB. Quando a taxa de transferência de calor é mantida constante, observa-se em todos os casos, que uma diminuição na temperatura do resfriamento do condensador (aumento na capacidade de resfriamento), gera amplitudes do GB maiores e frequências do GB menores. Estes resultados estão em concordância com os apresentados na literatura especializada (EMAMI *et al.*, 2009; XIA *et al.*, 2017; KHAZAEI *et al.*, 2010).

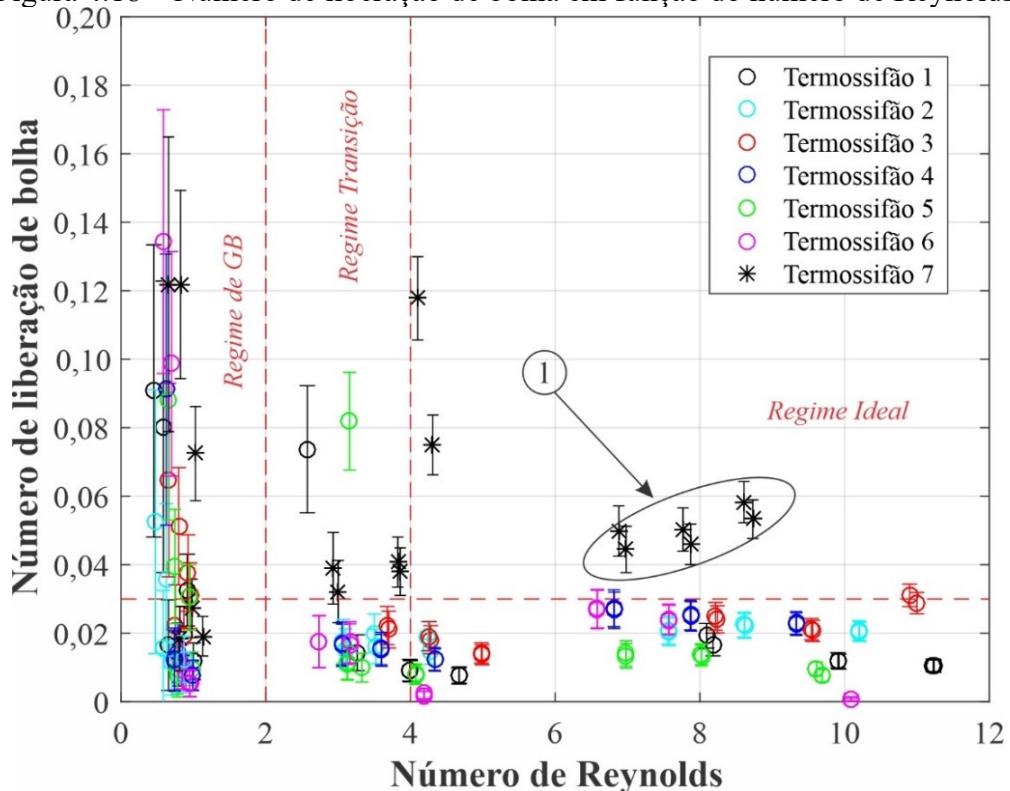
Contudo, é necessário organizar os resultados experimentais obtidos para o número de liberação de bolha, de maneira que se possa identificar a condição de taxa de transferência de calor inserida no evaporador e a condição de resfriamento no condensador que criam as condições necessárias para que o regime de GB seja estabelecido no termosifão. Para isto, neste trabalho propõe-se a utilização do número de Reynolds no termosifão (MANTELLI, 2013; FAGHRI, 1995), definido como:

$$Re_D = \frac{4q}{\pi D_{int} h_{lv} \mu_l} \quad (4.1)$$

onde q representa a taxa de transferência de calor e D_{int} o diâmetro interno do termosifão.

A Figura 4.18 mostra o número de liberação de bolha em função do número de Reynolds para os diferentes termossifões estudados neste trabalho. Observou-se que, quando o número de Reynolds no termossifão foi maior que 4 ($Re_D > 4$), todos os termossifões apresentaram números de liberação de bolha menores a 0,03, isto é, todos os termossifões operaram no regime ideal de operação, sem GB. A exceção neste caso acontece no termossifão 7 operando à 100 W (ponto 1 na Figura 4.18). Como foi explicado anteriormente, nesta faixa de operação, o termossifão 7 tem uma alta frequência de liberação de bolha, o que aumenta consideravelmente a movimentação da piscina de água e óleo, misturando os dois fluidos de trabalho e criando uma emulsão, que se comporta como um fluido único, o qual possui características diferentes às observadas nos outros termossifões estudados.

Figura 4.18 – Número de liberação de bolha em função do número de Reynolds.



Quando o número de Reynolds no termossifão foi menor que 2 ($Re_D < 2$), todos os termossifões operaram no regime de GB. Segundo Cisterna *et al.* (2020b), no regime de GB, é possível observar dois tipos de comportamento no termossifão, de baixo e alto desempenho, o qual será explicado com mais detalhes na próxima seção. Assim, observa-se que quando $Re_D < 2$, um mesmo termossifão pode apresentar valores do número de liberação de bolha

menores (alto desempenho) e maiores que 0,03 (baixo desempenho), como se mostra na Figura 4.18.

Finalmente quando o número de Reynolds no termossifão está na faixa de $2 < Re_D < 4$, se observa que os termossifões 1, 5 e 7 apresentaram valores do número de liberação de bolha maiores que 0,03, evidenciando assim a operação no regime de GB. No caso dos termossifões 2, 3, 4 e 6, observa-se que os valores do número de liberação de bolha foram sempre menores 0,03, operando assim no regime ideal. Desta forma, define-se a região $2 < Re_D < 4$, como uma região de transição, onde os termossifões podem ou não operar no regime de GB.

4.3.2 DESEMPENHO TÉRMICO DOS TERMOSSIFÕES OPERANDO COM DOIS FLUIDOS DE TRABALHO

Como mencionado anteriormente, um termossifão que opera em regime de GB apresenta duas condições extremas de operação, em termos de trocas térmicas, uma condição de baixo desempenho e uma condição de alto desempenho. Estas condições podem ser explicadas através dos gráficos do número de liberação de bolhas e das temperaturas média do evaporador e condensador apresentados nas Figuras 4.8 até 4.14.

A condição de operação de baixo desempenho acontece quando o calor fornecido na piscina de líquido é utilizado para tentar atingir a condição de superaquecimento de parede, necessário para a formação da bolha. Esta etapa é evidenciada através do aumento da temperatura da parede do evaporador e uma diminuição na temperatura da parede do condensador, isto pode ser observado no ponto A da Fig. 4.13a, onde se observa essa variação na temperatura do evaporador e do condensador. O valor do número de liberação de bolha nesta condição é máximo devido aos altos valores da temperatura de superaquecimento de parede necessária para transferir uma certa quantidade de calor. Assim a resistência térmica do termossifão neste período aumenta consideravelmente dependendo da amplitude do GB (fator de enchimento e número de Reynolds), conseqüentemente, o desempenho (capacidade de transferir calor) do termossifão é baixo nestas condições.

Quando a condição de superaquecimento de parede é atingida, a bolha é formada no sítio de nucleação, crescendo e sendo liberada quase que simultaneamente. A liberação desta bolha gera uma diminuição abrupta na temperatura da parede do evaporador e um aumento súbito na temperatura do condensador, isto pode ser observado no ponto B da Fig. 4.13a, onde

se observa essa variação na temperatura do evaporador e do condensador. O número de liberação de bolha nesta condição tende a ser menor que 0,03, mostrando uma diminuição no gradiente de temperatura entre o evaporador e o condensador, e uma diminuição da resistência térmica total do termossifão. Esse período de tempo é chamado de condição de alto desempenho do termossifão.

O desempenho de um termossifão representa a capacidade de transferência de calor do dispositivo para uma mesma diferença de temperatura entre evaporador e condensador. Uma forma de avaliar o desempenho de um termossifão é através da sua resistência térmica (R_T), que é definida como:

$$R_T = \frac{\Delta T}{q} = \frac{T_e - T_c}{q} \quad (4.2)$$

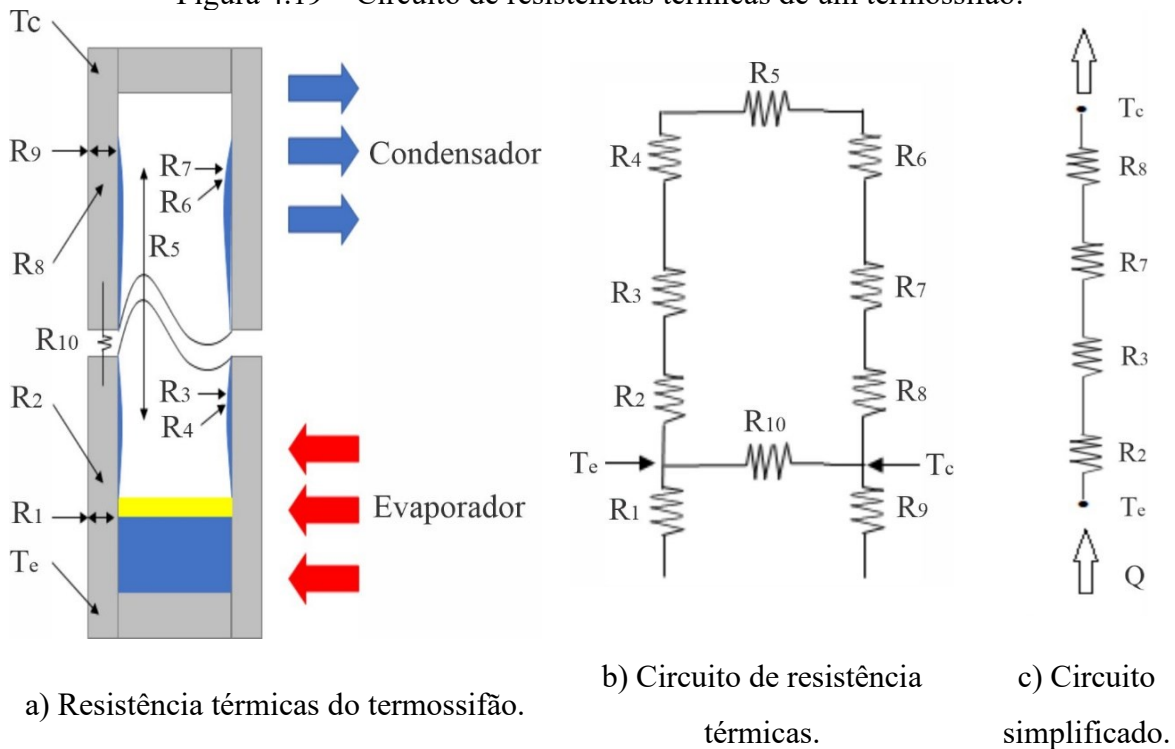
onde, q representa a taxa de transferência de calor e ΔT o gradiente de temperatura entre a parede do evaporador (T_e) e a parede do condensador (T_c).

Essa resistência térmica representa a dificuldade do termossifão em transportar calor, e quanto maior o seu valor, maior será a dificuldade desse transporte, isto é, menor capacidade de transferência de calor e maior a diferença do gradiente de temperatura entre o evaporador e o condensador para uma mesma taxa de transferência de calor imposta (MANTELLI, 2021).

Para um termossifão bifásico, a resistência térmica pode ser obtida, por meio de um conjunto de resistências térmicas associadas ao dispositivo, como apresentado na Figura 4.19.a. Após uma análise onde resistências e/ou circuitos menos importantes são desconsiderados, o circuito de resistências térmicas, pode ser simplificado, como apresentado na Figura 4.19.b.

Na Figura 4.19, as resistências R_1 e R_9 referem-se, respectivamente, às resistências externas ao evaporador e ao condensador. As resistências R_2 e R_{10} correspondem às resistências de condução na direção radial e axial, respectivamente. R_8 é a resistência de condução radial através do condensador. R_3 e R_7 são, respectivamente, as resistências de evaporação e condensação. R_4 e R_6 representam as resistências na interface líquido-vapor no evaporador e no condensador e, conforme Brost (1996 *apud* Mantelli, 2012, p. 9), podem ser desprezadas. R_5 refere-se à resistência associada a queda de temperatura de saturação entre o evaporador e o condensador, ocasionada pela queda de pressão no escoamento do vapor, podendo ser desprezada também.

Figura 4.19 – Circuito de resistências térmicas de um termossifão.



Fonte: Adaptado de Mantelli (2013).

Segundo Brost (1996 *apud* Mantelli, 2012, p. 9), a resistência R_{10} pode ser desprezada quando a seguinte desigualdade é satisfeita:

$$\frac{R_{10}}{R_2 + R_3 + R_5 + R_7 + R_8} > 20 \quad (4.3)$$

No presente caso, as resistências R_1 e R_9 não serão consideradas. Assim, o circuito térmico apresentado na Fig. 4.19.b pode ser simplificado para o circuito apresentado na Fig. 4.19.c, de forma que a resistência térmica total, que será utilizada nesta dissertação é representada pela expressão:

$$R_{MT} = R_2 + R_3 + R_7 + R_8 \quad (4.4)$$

onde as resistências térmicas R_2 , R_3 , R_7 e R_8 são estimadas, através das seguintes expressões apresentadas por Mantelli (2013):

$$R_2 = \frac{\ln(D_{ext}/D_{int})}{2\pi l_e k_w} \quad (4.5)$$

onde D_{ext} e D_{int} são respectivamente o diâmetro externo e o diâmetro interno do termossifão, l_e o comprimento do evaporador e k_w o coeficiente de condutividade térmica da parede do termossifão de aço, sendo considerado igual a 19[W/mK].

$$R_8 = \frac{\ln(D_{ext}/D_{int})}{2\pi l_c k_w} \quad (4.6)$$

onde l_c é o comprimento do condensador.

$$R_3 = \frac{1}{h_{evap} A_{evap}} \quad (4.7)$$

onde A_{evap} é a área externa do evaporador e h_{evap} o coeficiente de transferência de calor na região do evaporador, que segundo Kiyomura *et al.* (2017), pode ser obtido através da seguinte relação:

$$h_{evap} = 154 \left(\frac{k_l}{L_m} \right) \left[\left(\frac{c_{pl} T_{sat}}{h_{lv}} \right)^{1,72} \left(\frac{c_{pl} \mu_l}{k_l} \right)^{-0,34} \left(\frac{d_b q}{\mu_l h_{lv}} \right)^{0,62} \left(\frac{13}{L_m} \right)^{-0,05} \right] \quad (4.8)$$

onde L_m é o comprimento característico da bolha, expresso por:

$$L_m = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (4.9)$$

o diâmetro de partida de bolha (d_b) adotado para essa análise é proveniente do modelo proposto por Gorenflo *et al.* (1986), dado pela relação:

$$d_b = 16 \left(\frac{Ja^4 \alpha_l^2}{g} \right)^{1/3} \left[1 + \left(1 + \frac{2\pi}{3Ja} \right)^{1/2} \right]^{4/3} \quad (4.10)$$

E finalmente, a resistência térmica de condensação é dada por:

$$R_7 = \frac{1}{h_{cond}A_{cond}} \quad (4.11)$$

onde A_{cond} é a área externa do condensador e h_{cond} o coeficiente de transferência de calor na região do condensador, segundo Kaminaga *et al.* (1992a) e Kaminaga *et al.* (1992b), pode ser expresso por:

$$h_{cond} = 25(k_l/D_{int})Re_D^{0,25}Pr_l^{0,4} \quad (4.12)$$

Para os dispositivos estudados, a ordem de grandeza das resistências térmicas está associada com as condições em que o termossifão é submetido, como: taxa de transferência de calor, temperatura de vapor, temperatura de resfriamento do condensador, etc. Deste modo, espera-se que a ordem de grandeza dessas resistências varie de acordo com o regime de operação do termossifão, isto é, condição com e sem *Geysers Boiling*. Para a condição sem GB, as resistências de condução na direção radial através do evaporador (R_2) e do condensador (R_8) foram, respectivamente, $5 \cdot 10^{-3}$ [K/W] e $6 \cdot 10^{-3}$ [K/W]. Já as resistências de evaporação (R_3) e condensação (R_7) apresentaram, respectivamente, $1,3 \cdot 10^{-1}$ [K/W] e $4,8 \cdot 10^{-2}$ [K/W]. Para a condição de *Geysers Boiling*, apenas as resistências 3 e 7 tiveram valores de ordem de grandeza diferentes sendo, respectivamente, $2,2 \cdot 10^{-1}$ [K/W] e $5 \cdot 10^{-2}$ [K/W].

Assim, a partir da definição de resistência térmica (Eq. 4.2) e da equação do circuito simplificado para a resistência térmica (Eq. 4.4), é possível avaliar o desempenho do dispositivo em função do número de Reynolds. As Figuras 4.20 e 4.21 mostram a resistência térmica dos termossifões estudados neste trabalho em função do número de Reynolds, para a condição de alto e baixo desempenho respectivamente. É importante destacar que, a condição de baixo desempenho ocorre quando se tem um aumento considerável na temperatura do evaporador e uma diminuição da temperatura do condensador (ver Fig. 4.13a ponto A). Já a condição de alto desempenho, tem-se uma diminuição na temperatura do evaporador e um aumento da temperatura do condensador (ver Fig. 4.13a ponto B).

Para a condição de alto desempenho, apresentado na Figura 4.20, durante o regime de GB, observa-se que o termossifão 6 (60% água e 10% óleo) e o termossifão 7 (20% água e 20% óleo) apresentaram os piores desempenhos do dispositivo, isto é, precisaram de maiores

gradientes de temperatura para transferir uma certa quantidade de calor. Esses mesmos dispositivos apresentaram um comportamento similar nos regimes de transição ($2 < Re_D < 4$) e ideal ($Re_D > 4$). O comportamento desses termossifões foram parecidos ao modelo teórico apresentado na literatura para a resistência térmica considerando um único fluido (Kaminaga *et al.*, 1992a; Kaminaga *et al.* 1992b; e Kiyomura *et al.*, 2017).

Ao comparar os termossifões da Fig. 4.20 com o modelo teórico, nota-se que mesmo usando uma certa quantidade de óleo em conjunto com a água, a capacidade de transferir calor (ou seja, o desempenho do dispositivo) está associado ao fluido primário (água). Também, o modelo teórico feito para um único fluido, consegue representar a transferência de calor feita pela água (termossifão 1 e termossifão 2) e ao se comparar com os termossifões que utilizam o óleo como fluido secundário, observa-se que o desempenho térmico do dispositivo não é afetado para a região sem GB.

Figura 4.20 – Resistência térmica em função do número de Reynolds para a condição de alto desempenho.

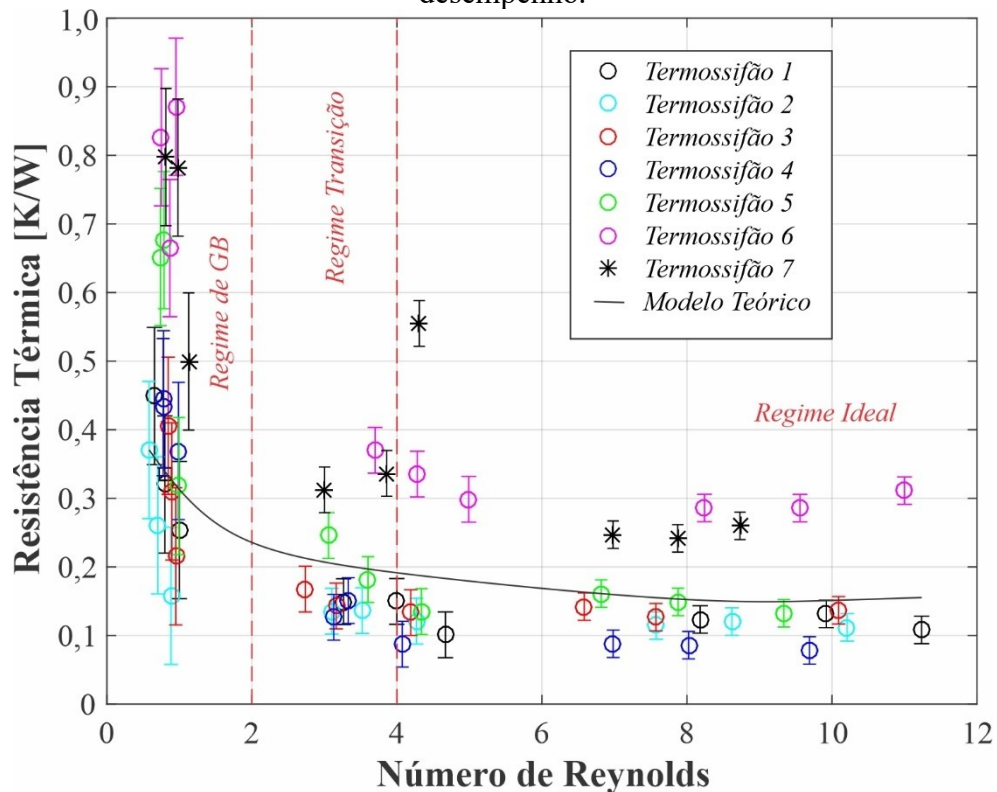
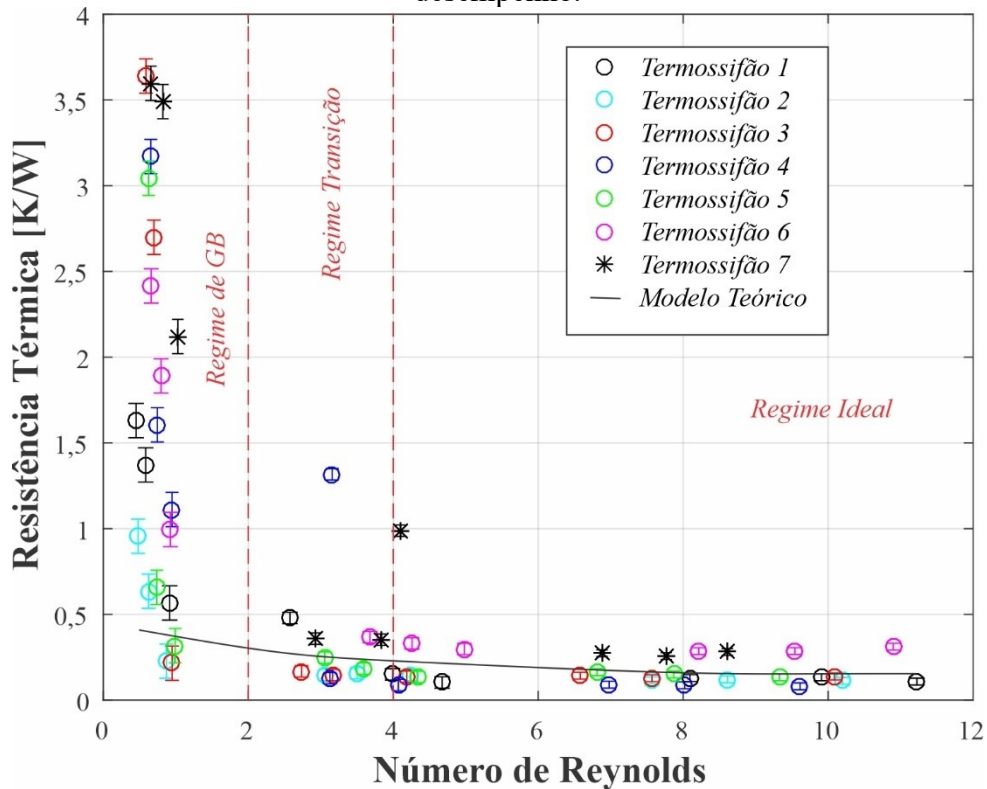


Figura 4.21– Resistência térmica em função do número de Reynolds para a condição de baixo desempenho.



Para a região de GB, apresentado na Fig. 4.20, observa-se que o modelo teórico consegue representar o desempenho térmico dos dispositivos, porém com uma margem de erro maior. Contudo, para os termossifões 5, 6 e 7 o mesmo não acontece, uma vez que esses dispositivos apresentaram amplitudes maiores devido a camada de óleo, gerando desempenhos muito menores do que era esperado pelo modelo teórico. Neste caso, a camada de óleo proporcionou uma diminuição do desempenho que é mais acentuada nos termossifões 6 e 7.

Na região de GB, para os dispositivos que operam com dois fluidos de trabalho, na condição de alto desempenho, foi observado que o termossifão 3 apresentou a menor resistência térmica, o que pode estar associado a influência do efeito da pressão hidrostática. Por outro lado, os dispositivos com as maiores resistências térmicas (isto é, menor capacidade de transferência de calor) foram os termossifões 6 e 7, que são os dispositivos que apresentaram maiores amplitudes e possuem uma pequena de camada de óleo, mostrando novamente a influência do “efeito membrana”.

Outro comportamento que pode ser observado no gráfico de alto desempenho (Fig. 4.20) é que a diminuição na temperatura de resfriamento do condensador provoca uma diminuição da capacidade de transferência de calor (maior resistência térmica). Esse fato pode

ser observado, também, nos gráficos das Figuras 4.8 a 4.14, onde para a condição de baixo resfriamento ocorreram maiores picos de temperatura do evaporador e do condensador no regime de GB.

Do mesmo modo, o aumento da taxa de transferência de calor implica em um aumento no desempenho do dispositivo e isso ocorre porque o termossifão se aproxima da condição ideal de operação. O aumento da taxa de transferência de calor proporciona condições em que a diminuição da temperatura do condensador não provoca mudanças no desempenho do dispositivo.

Observando a Figura 4.21, onde se apresenta dados dos dispositivos estudados em baixo desempenho, nota-se que os regimes de transição ($2 < Re_D < 4$) e o regime ideal ($Re_D > 4$) dos termossifões 1, 2, 3, 4 e 5 apresentaram um comportamento similar ao que o modelo teórico previa. Já os termossifões 6 e 7 (aqueles que apresentaram maiores amplitudes de GB), apresentaram resistências térmicas maiores que as esperadas pelo modelo teórico para esses regimes, evidenciando novamente a influência da camada de líquido no desempenho do dispositivo.

É importante também destacar que, em dispositivos que operam com dois fluidos, quando a camada do líquido secundário é menor, ocorre um “efeito membrana” (visto na seção 4.3.1.2), que produz elevadas amplitudes de GB no termossifão e, por consequência, gera uma diminuição do desempenho. Para camadas de líquido secundário maiores, tem-se altas amplitudes de GB ocasionadas pela pressão hidrostática onde o desempenho do dispositivo não é afetado.

Na região de GB, se observa que, na condição de baixo desempenho, nenhum termossifão conseguiu ser representado pelo modelo matemático. As diferenças dos valores medidos quando comparado ao modelo teórico foram superiores a 300%.

Para a condição de baixo desempenho, na região de GB, os termossifões que apresentaram piores desempenhos (maior resistência) foram os termossifões com melhores desempenhos para a condição de alto desempenho, com exceção do termossifão 7.

As Figuras 4.22 e 4.23 apresentam as condições de alto e baixo desempenho, respectivamente. Nas imagens, são apresentadas as diferenças entre os dados experimentais das resistências térmicas e resistência térmica teórica, de forma que esta engloba os modelos para a ebulição nucleada em piscina (Kiyomura *et al.*, 2017) e condensação (Kaminaga *et al.*, 1992a e Kaminaga *et al.*, 1992b).

Figura 4.22— Comparação entre a resistência térmica teórica e resistência experimental para a condição de alto desempenho.

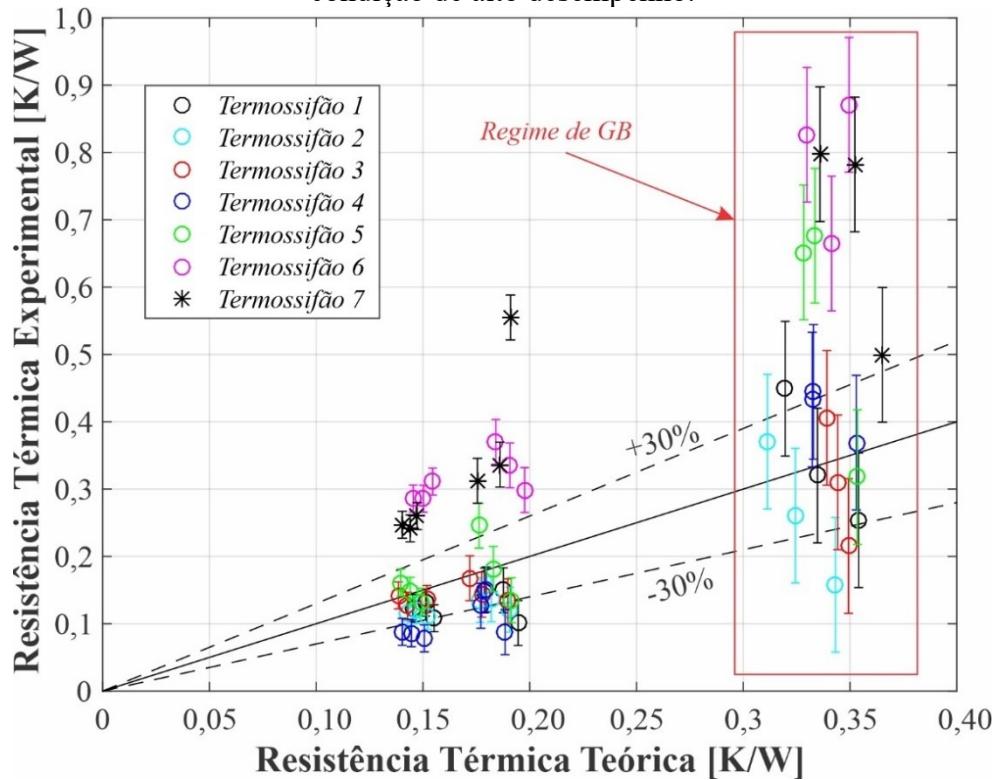
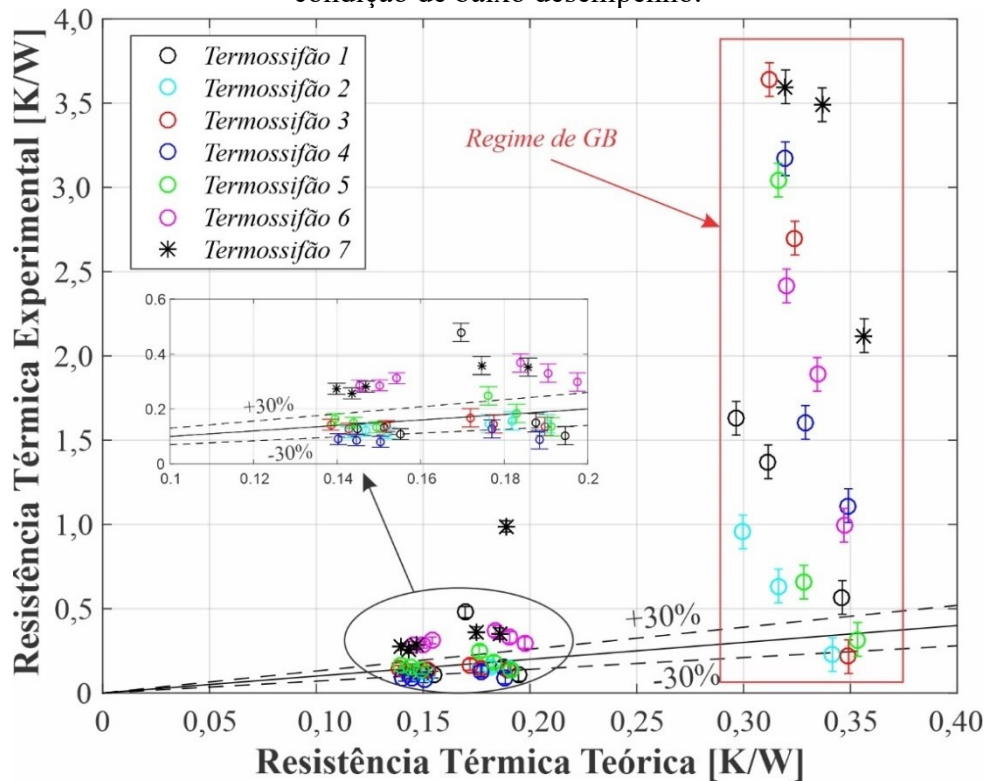


Figura 4.23— Comparação entre a resistência térmica teórica e resistência experimental para a condição de baixo desempenho.



Na Figura 4.22, referente à condição de alto desempenho, todos os termossifões, exceto os termossifões 6 e 7, apresentaram uma diferença aproximada de 30% tanto na região sem quanto com GB. Os termossifões 6 e 7 apresentaram uma diferença acima de 30% e foram os dispositivos que apresentaram as maiores amplitudes de GB, uma vez que a camada de óleo era suficientemente pequena, de modo a influenciar o comportamento do desempenho do dispositivo mesmo sem a ocorrência do GB.

Na Figura 4.23, referente à condição de baixo desempenho, para a região sem GB, o mesmo comportamento é observado para os termossifões de 1 a 5, que apresentaram diferenças na faixa de 30% e para os termossifões 6 e 7 com desvios acima de 30%. Para a região de GB (isto é, $Re_D < 2$), as diferenças foram grandes e não quantificáveis, não havendo um modelo adequado na literatura para prever o comportamento deste tipo de termossifão.

Portanto, para a condição de alto desempenho, que corresponde a máxima capacidade de transferência de calor do termossifão, é possível modelar o dispositivo através dos modelos de resistência presentes na literatura utilizando exclusivamente o fluido primário, sendo as únicas exceções os termossifões 6 e 7. Já para a condição de baixo desempenho, que corresponde a formação e o crescimento da bolha, os modelos da literatura não conseguem representar bem essa condição. De fato, o dispositivo está acumulando energia, não ocorrendo a transferência de calor, mas sim, a realização de trabalho proveniente da movimentação do fluido.

Assim, vimos que os modelos de resistência térmica não são modelos adequados para prever o comportamento do dispositivo operando no regime de GB. Para a condição de alto e baixo desempenho os modelos de resistência térmica apresentaram desvios elevados em relação aos dados experimentais, e deste modo, não conseguem prever as oscilações de temperatura durante o regime de GB no dispositivo. Assim, na próxima seção serão apresentados os parâmetros de frequência e amplitude de GB que possibilitem a obtenção das oscilações de temperatura no dispositivo.

4.3.3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS PROPOSTOS PARA AMPLITUDE E FREQUÊNCIA DE GB

Nesta seção, os modelos teóricos apresentados no Capítulo 3 para a determinação da amplitude e frequência do GB são comparados e ajustados aos dados experimentais obtidos neste trabalho.

4.3.3.1 Validação do modelo para a amplitude do Geysers Boiling

Como mencionado anteriormente, a amplitude de GB pode ser representada através da utilização do número de liberação de bolha apresentado por Cisterna *et al.* (2020a), e definido na Eq. 3.6, a qual, por conveniência, é reescrita a seguir:

$$\varphi_b = \frac{\Delta T_w}{T_v} = C_1 \frac{Co^{1,5} Pr_l Gr_c}{Bo_c^{1,44} Ja_c} \quad (3.6)$$

Os números adimensionais corrigidos de Jakob (Ja_c), Bond (Bo_c) e Grashof (Gr_c) são definidos respectivamente nas equações (3.7), (3.8) e (3.9), sendo estes dependentes da temperatura de operação, propriedades termofísicas do fluido de trabalho principal (água) e o diâmetro interno do termossifão.

O principal problema observado no modelo apresentado por Cisterna *et al.* (2020a) é a dependência do número de confinamento (Co) associado ao diâmetro de partida da bolha (Equação 3.10), que necessita de dados experimentais para a implementação. Nesse contexto, procurou-se encontrar uma correlação para o número de confinamento em função dos diferentes números adimensionais presentes na correlação da equação (3.6), isto é, os números corrigidos de Jakob (Ja_c), Bond (Bo_c) e Grashof (Gr_c) e o número de Prandtl (Pr_l).

Para isto, primeiramente, a Eq. 3.6 foi reagrupada de maneira a isolar o número de confinamento em função das outras variáveis da equação, as quais podem ser obtidas a partir dos dados experimentais. Desta forma, foi utilizado um número de confinamento corrigido, dado por:

$$Co' = Co(C_1)^{2/3} = \left[\frac{\varphi_b Bo_c^{1,44} Ja_c}{Pr_l Gr_c} \right]^{2/3} \quad (4.13)$$

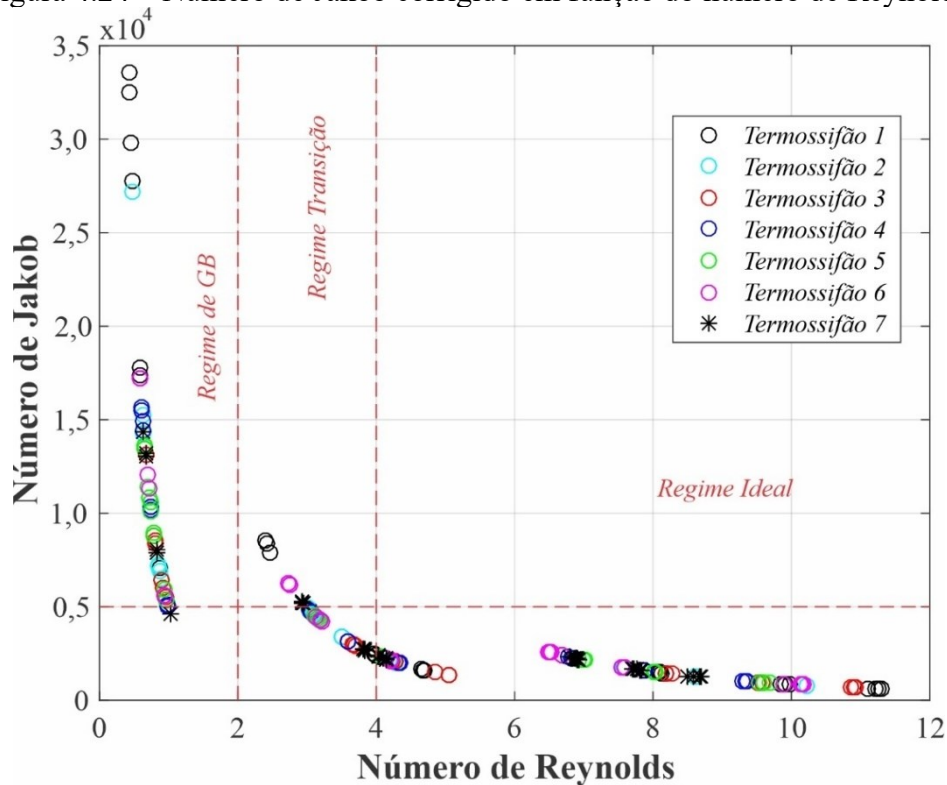
Os valores experimentais foram confrontados e esboçados em função dos diferentes números adimensionais corrigidos, observando-se que o número de confinamento e, conseqüentemente, o diâmetro de partida da bolha, possui uma maior dependência do número de Jakob corrigido (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Variabilidade entre os dados experimentais e o número de confinamento.

Número adimensional	Coefficiente de correlação (R^2)
Grashof corrigido	0,35
Bond corrigido	0,46
Prandtl	0,79
Jakob corrigido	0,88

O número de Jakob corrigido em função do número de Reynolds é apresentado na Figura 4.24, onde se observou que existe uma relação entre esses números adimensionais que estão associadas ao regime de GB.

Figura 4.24 – Número de Jakob corrigido em função do número de Reynolds.

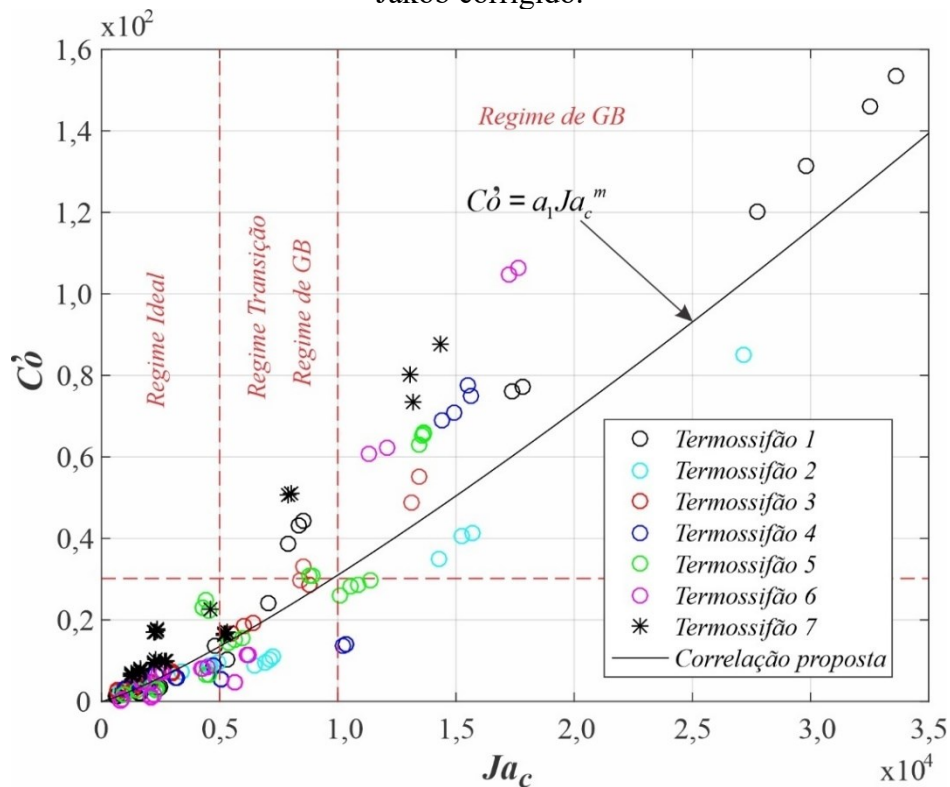


Na Figura 4.24 foi observado que quando o número de Jakob corrigido foi menor do que 5000, nenhum dispositivo apresentou a presença de GB, enquanto que para valores maiores, os dispositivos operaram no regime de GB ou no regime de transição. Como visto anteriormente na seção 4.3.1.3, e apresentado na Fig. 4.18, o GB pode ser associado ao número de Reynolds onde, para $Re_D < 2$ o termosossifão opera em GB, para $Re_D > 4$ o dispositivo opera no regime ideal, e para $2 < Re_D < 4$ corresponde a uma transição entre os regimes em que o GB pode ou não acontecer, ou seja, alguns termosossifões apresentaram GB e outros não.

É importante destacar que o número de Jakob corrigido é uma relação entre o calor sensível e o calor latente, o que indica que o GB é um fenômeno que acontece quando os efeitos do calor sensível são superiores ao do calor latente, uma vez que, logo antes da erupção da bolha de vapor, a piscina de líquido está aumentando sua temperatura para atingir a condição de superaquecimento de parede necessária para gerar a formação de bolha. Portanto, essa é uma região onde o calor sensível é trocado. Já para o regime ideal, o termossifão é governado principalmente pelo calor latente usado na mudança de fase.

Destá forma, uma vez identificada a faixa do número de Jakob onde o termossifão opera no regime de GB, é possível comparar o número de confinamento corrigido obtido a partir da equação (4.13) com o número de Jakob corrigido, como mostrado na Figura 4.25. Nesta figura, o número de confinamento corrigido (apresentado na Eq. 4.13) corresponde ao número de confinamento (Eq. 3.10) multiplicado por uma constante (C_1). Desta maneira, o aumento do número de confinamento corrigido é na verdade, resultado do aumento do diâmetro de partida da bolha.

Figura 4.25 – Comportamento do número de confinamento corrigido em função do número de Jakob corrigido.



A partir disso, se observa que à medida que se aumenta o número de Jakob corrigido o diâmetro de partida da bolha também aumenta, ou seja, as bolhas precisam ser maiores para que possam sair do sítio de nucleação. Para o regime ideal de operação, isto é, $Ja_c < 5000$, observa-se menores diâmetros de partida de bolha, com número de confinamento corrigido menor do que 30.

À medida que o número de Jakob aumenta, principalmente em casos com regimes de GB, o número de confinamento corrigido aumenta, isto é, o diâmetro de partida de bolha aumenta. Portanto, maiores números de Jakob na região de GB significam maiores números de confinamento e maiores diâmetros de partida de bolha. O comportamento deste fenômeno para todos os termosifões (1 a 7) seguem as tendências da correlação apresentada na Eq. 4.14, ou seja, existe uma dependência do número de confinamento corrigido com o número de Jakob corrigido.

A correlação proposta para representar o comportamento geral do número de confinamento em função do Jakob corrigido (Fig. 4.25) para todos os termosifões estudados tem o seguinte formato:

$$Co' = a_1 Ja_c^m \quad (4.14)$$

onde, a_1 e m são as constantes de ajuste da regressão não-linear obtida pelo método dos mínimos quadrados, que no caso da Figura 4.25 são $4,97 \cdot 10^{-4}$ e 1,2, respectivamente, com um erro padrão absoluto de 44%.

Observa-se também na Figura 4.25 que existe uma relação entre o número de confinamento corrigido e o número de Jakob corrigido em função do fator de enchimento relativo dos termosifões, dada por:

$$F_R = F_1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} F_2 \quad (4.15)$$

onde F_1 e F_2 são os fatores de enchimento do fluido primário (água) e secundário (óleo) e ρ_1 e ρ_2 são as massas específicas dos fluidos primário e secundário, respectivamente.

Desta forma, aplicou-se a equação (4.1) individualmente a cada um dos termosifões estudados para encontrar uma relação entre as constantes de ajustes e o fator de enchimento relativo. É importante destacar que, em todos os casos, o expoente m da equação (4.14) foi mantido constante em 1,2, mudando-se somente o valor do coeficiente angular a_1 , cujos valores

para cada caso, são apresentados na Tabela 4.4, juntamente com o respectivo erro padrão absoluto, que na média foi menor a 25%. O caso geral desta tabela se refere a um valor único para o coeficiente angular de todos os termossifões testados.

Tabela 4.4 – Coeficientes a_1 para cada teste.

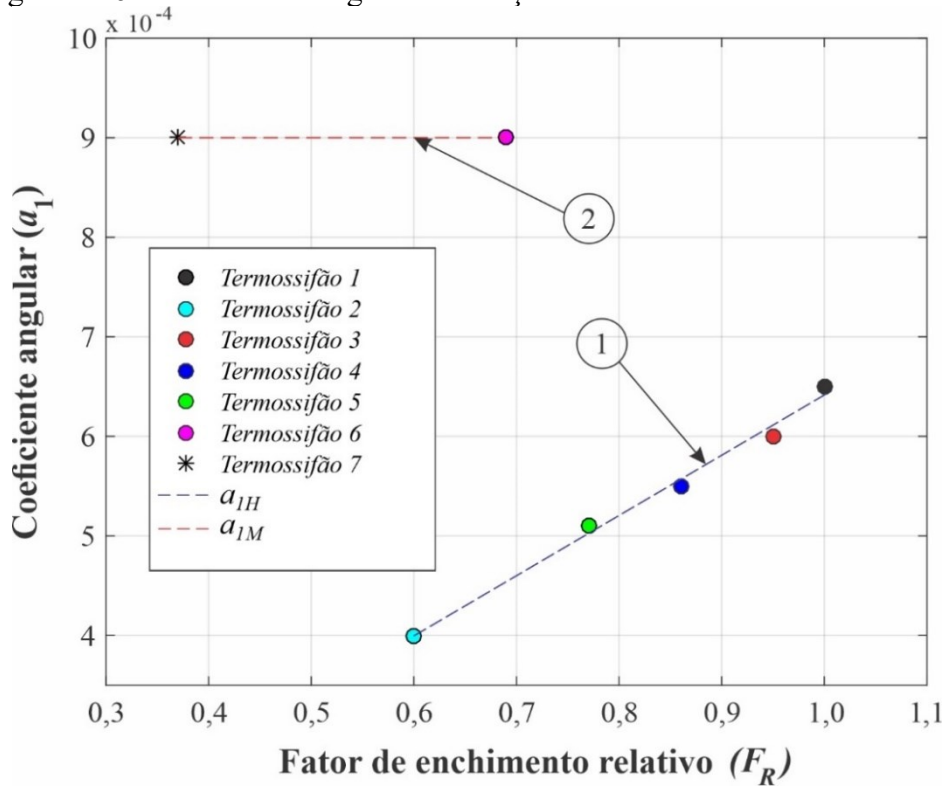
Proporção	a_1	Erro Padrão Absoluto
Termossifão 1 – 100% Água e 0% Óleo	$6,5 \cdot 10^{-4}$	35%
Termossifão 2 – 60% Água e 0% Óleo	$4 \cdot 10^{-4}$	8%
Termossifão 3 – 60% Água e 10% Óleo	$9 \cdot 10^{-4}$	10%
Termossifão 4 – 60% Água e 20% Óleo	$5,1 \cdot 10^{-4}$	36%
Termossifão 5 – 60% Água e 30% Óleo	$5,5 \cdot 10^{-4}$	31%
Termossifão 6 – 60% Água e 40% Óleo	$6 \cdot 10^{-4}$	23%
Termossifão 7 – 20% Água e 20% Óleo	$9 \cdot 10^{-4}$	35%
Caso geral	$4,97 \cdot 10^{-4}$	44%

A Figura 4.26 mostra o comportamento do coeficiente angular de acordo com a Eq. 4.14 em função do fator de enchimento relativo, apresentado na Eq. 4.15. Observa-se que existem dois grupos de termossifões que possuem comportamentos diferentes.

O grupo 1 da Fig. 4.26, formado pelos termossifões 1, 2, 3, 4 e 5, mostra que a medida em que o fator de enchimento relativo aumenta, o coeficiente angular a_1 , também aumenta. Este grupo de termossifões pode ser associado ao grupo de termossifões onde o fenômeno de GB está diretamente relacionado à pressão hidrostática do fluido de trabalho, isto é, quanto maior é o fator de enchimento maior é a amplitude do GB. E esse grupo é modelado através da seguinte equação:

$$a_{1H} = (6F_R + 0,4) \cdot 10^{-4} \quad (4.16)$$

Figura 4.26 – Coeficiente angular em função do fator de enchimento relativo.

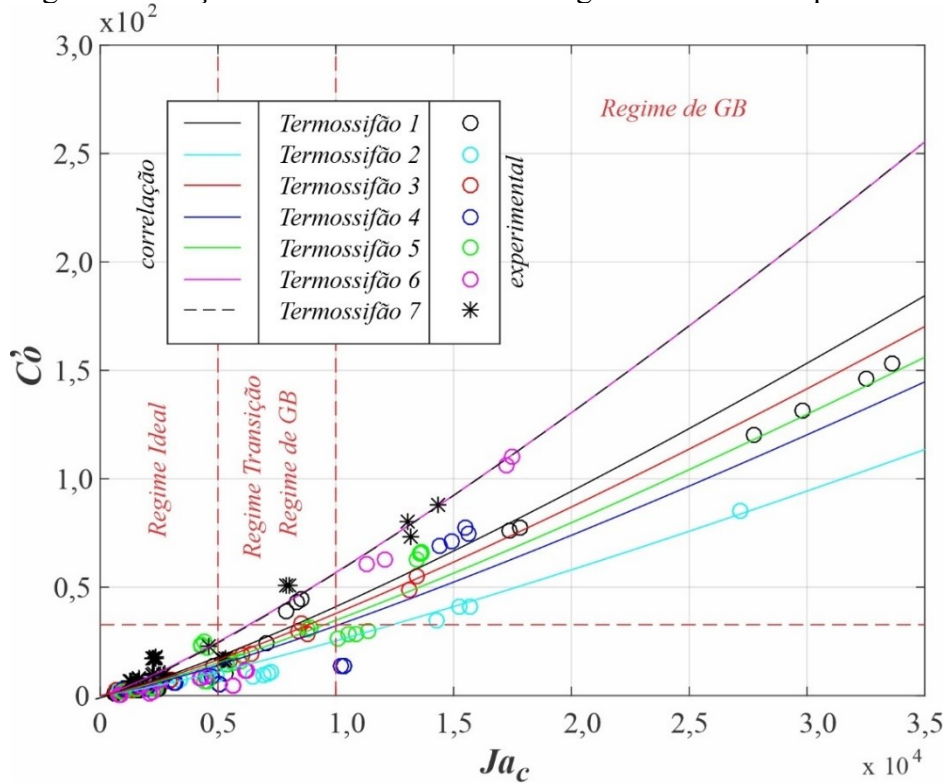


O grupo 2 da Figura 4.26 é formado pelos termossifões 6 e 7, onde o fator de enchimento de óleo era 10% e 20%, respectivamente. Observou-se aqui um comportamento totalmente diferente, onde a relação entre o fator de enchimento relativo e o coeficiente angular é uma constante. Este segundo grupo está associado aos termossifões onde o fenômeno de GB é influenciado principalmente pelo “efeito membrana”, explicado na seção 4.3.1.2. Neste caso tem-se:

$$a_{1M} = 9 \cdot 10^{-4} \quad (4.17)$$

Desta forma, ao aplicar as equações (4.16) e (4.17) na equação (4.14), se tem uma correlação para o coeficiente de confinamento em função do número de Jakob corrigido com um erro médio menor a 25%. O comportamento desta correlação é apresentado na Figura 4.27, onde também é apresentada uma comparação com os dados experimentais.

Figura 4.27 – Comparação entre a correlação proposta para o Número de confinamento corrigido em função do número de Jakob corrigido e os dados experimentais.



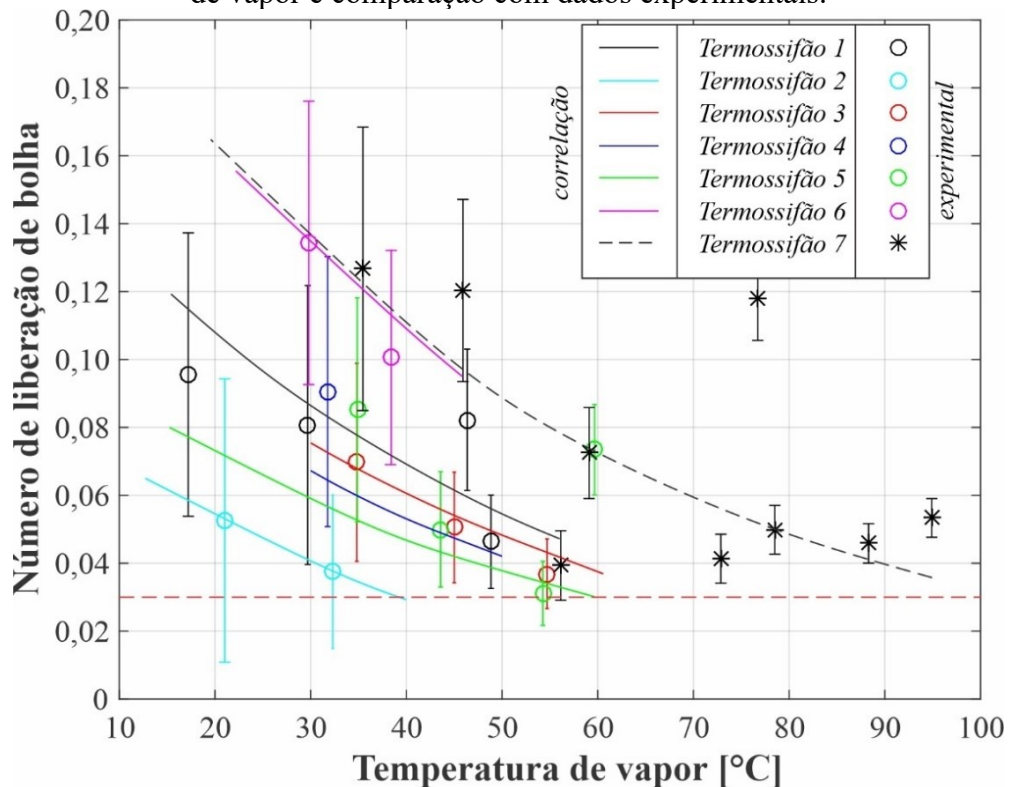
Substituindo a equação (4.14) na equação (3.6) é possível ter um modelo para a amplitude do fenômeno de GB (número de liberação de bolha) que pode ser aplicada de forma direta, em função dos números adimensionais corrigidos de Jakob (Ja_c), Bond (Bo_c) e Grashof (Gr_c), que dependem apenas da geometria e temperatura de operação do termossifão. Assim, o número de liberação de bolhas é dado por:

$$\varphi_b = a_1^{1,5} \left(\frac{Ja_c^{0,8} Pr_l Gr_c}{Bo_c^{1,44}} \right) \quad (4.18)$$

onde a constante a_1 é dada pelas equações (4.16) e (4.17) dependendo do principal mecanismo de geração de GB.

A Figura 4.28 mostra o número de liberação de bolha experimental e o teórico, determinado através da Eq. 4.18, em função da temperatura de vapor, para todos os termossifões estudados neste trabalho que operam em regime de GB.

Figura 4.28 – Modelo teórico para o número de liberação de bolha em função da temperatura de vapor e comparação com dados experimentais.

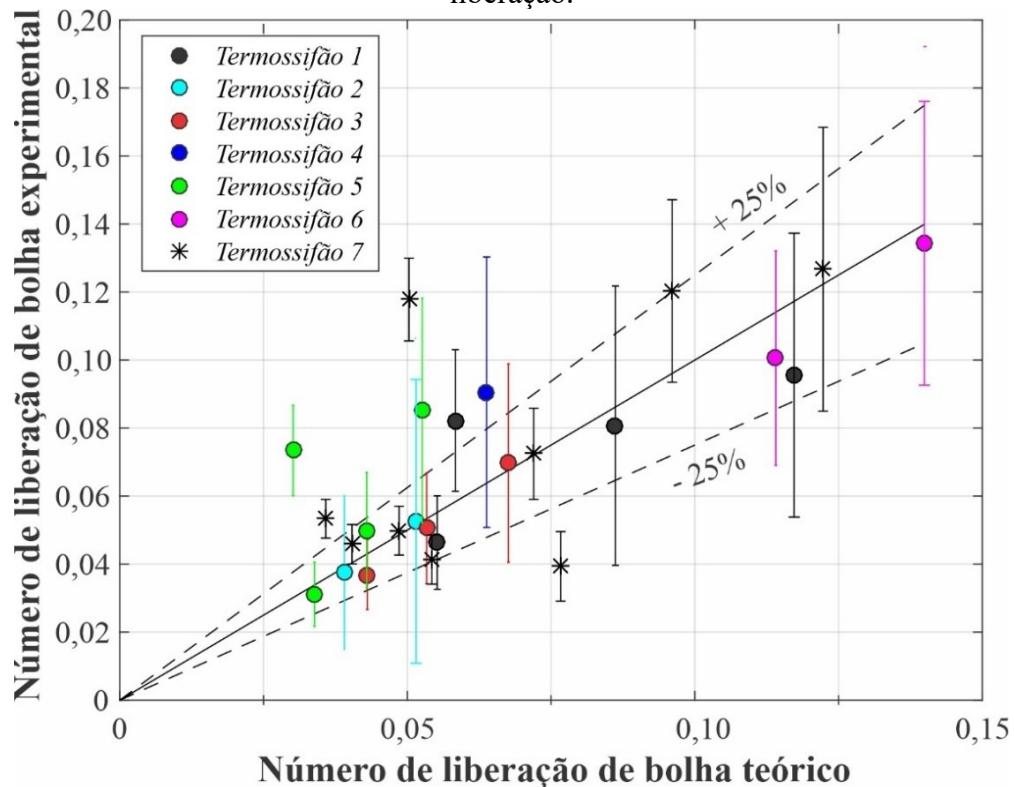


Observa-se que o modelo proposto para o número de liberação de bolha, independentemente do número de confinamento, apresenta resultados coerentes com os dados experimentais com um erro médio inferior a 25%, como mostrado na Figura 4.29.

Os maiores erros observados no modelo apresentado na Fig. 4.29 foram para o termosifão 7, sendo esse o dispositivo que apresentou um comportamento mais afastado dos modelos apresentados nesse trabalho, com maiores desvios tanto para o modelo teórico da resistência quanto para o modelo do número de liberação de bolha.

Portanto, conforme observado nas figuras de resistência térmica (Figs. 4.20 e 4.21), termosifões que utilizam dois fluidos de trabalho onde um dos fluidos é utilizado para a transferência de calor e o outro para a geração de GB podem ser modelados a partir de sistemas de resistência térmica quando eles têm o número de Reynolds maior de 4, que é a região em que eles não apresentam GB. Quando o termosifão apresenta GB, existem duas resistências térmicas: uma de alto desempenho (resistência baixa) e a outra de baixo desempenho (resistência alta) e a amplitude dessas resistências vai depender da amplitude do fenômeno de GB.

Figura 4.29 – Desvio entre os dados experimentais e a correlação proposta para o número de liberação.



Já a amplitude do fenômeno GB pode ser modelada por meio da Eq. 4.18, que é a equação do número de bolha com erros menores que 25%, como mostrado anteriormente. Desta maneira, tem-se todo o equacionamento necessário para o projeto de termossifão operando com dois fluidos de trabalho.

4.3.3.2 Validação do modelo para a frequência do Geysers Boiling

A equação para prever a frequência do GB desenvolvida neste trabalho é proveniente da expressão obtida por Cisterna *et al.* (2020) (Eq. 3.6) e das expressões que relacionam a frequência de liberação de bolha com o diâmetro de partida de bolha.

Na Tabela 4.5 são apresentadas as relações obtidas para a frequência do GB em função das propriedades físicas que governam o fenômeno.

Tabela 4.5 – Equações para a frequência em função do número de liberação de bolha.

Modelos de Referência	Física	Relações Resultantes
Ivey (1967) e Cisterna <i>et al.</i> (2020)	Inércia	$f^3 \varphi_b = \frac{C}{D_{int}^{1,5}} \frac{Pr_l Gr_c}{Bo_c^{1,44} Ja_c}$ (4.19)
Cole (1960) e Cisterna <i>et al.</i> (2020)	Inércia	$f^3 \varphi_b = \left(\frac{1,54 \cdot 10^{-3}}{C_d^{1,5}} \right) \left[\frac{Pr_l Gr_c^{2,5}}{Bo_c^{1,44} Ja_c} \right] \left(\frac{\nu_l}{D_{int}^2} \right)^3$ (4.20)
Ivey (1967) e Cisterna <i>et al.</i> (2020)	Transferência de Calor	$f^{3/4} \varphi_b = \frac{C}{D_{int}^{1,5}} \frac{Pr_l Gr_c}{Bo_c^{1,44} Ja_c}$ (4.21)
Mikic e Rohsenow (1969) e Cisterna <i>et al.</i> (2020)	Transferência de Calor	$f^{-1,5} \varphi_b = \left(\frac{1,75 \cdot 10^6}{\pi^{3/2}} \right) \left[\frac{Bo_c^{2,88}}{Pr_l^2 Gr_c^2 Ja_c} \right] \left(\frac{\alpha_l}{D_{int}^2} \right)^{-1,5}$ (4.22)
Zuber (1963) e Cisterna <i>et al.</i> (2020)	Convecção Natural	$f \varphi_b = 14,75 \frac{Gr_c^{0,5} Bo_c^{0,25}}{Ja_c} \left(\frac{\nu_l}{D_{int}^2} \right)$ (4.23)

Para a validação dos modelos teóricos para a frequência do GB apresentados na Tab. 4.5, cada equação foi relacionada com os dados experimentais por meio do coeficiente de correlação com o intuito de verificar a variabilidade existente entre os dados experimentais na região de GB. Observou-se que existem três grupos de modelos para representar a frequência de ocorrência do GB, sendo eles governados: pelos efeitos de inércia; pela taxa de transferência de calor e pela convecção natural. Assim, na comparação destes modelos com os dados experimentais, observou-se que os modelos governados pela inércia de Ivey (1967) e Cole (1960) apresentaram baixos coeficiente de correlação (0,05), mostrando que neste caso os efeitos da inércia não são o principal mecanismo na formação de GB. Para os modelos governados pela transferência de calor, Ivey (1967) apresentou o maior ajuste observado entre todos os modelos (0,86). Já o modelo de Mikic e Rohsenow (1969) só apresentou um ajuste de 0,16 para o coeficiente de variação. Finalmente para o modelo de Zuber (1963), governado pela convecção natural, o coeficiente de determinação foi 0,46.

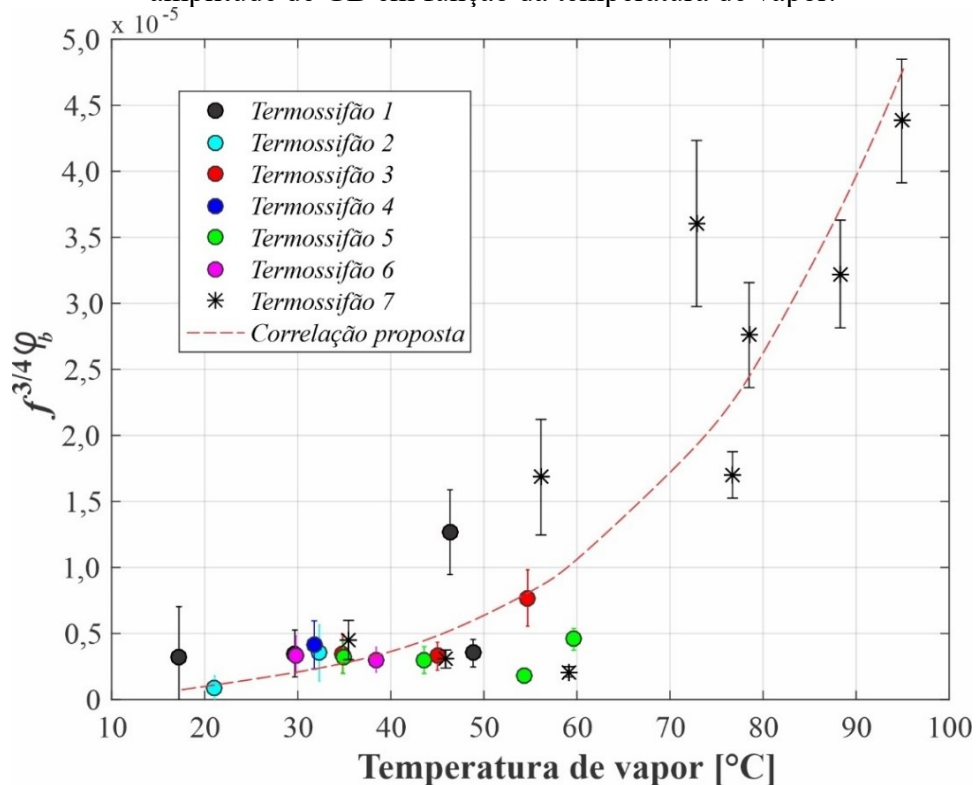
Deste modo, por meio do coeficiente de variação, o modelo proveniente das relações de Ivey (1967) (controlado pela transferência de calor) e de Cisterna *et al.* (2020a) (Eq. 4.21), apresentou uma menor variabilidade com os dados experimentais na região de GB. O termo C desta relação é uma constante que foi obtida pelo método dos mínimos quadrados, resultando na relação:

$$f^{3/4} \varphi_b = \frac{4,78 \cdot 10^{-5} \text{ Pr}_l \text{ Gr}_c}{D_{\text{int}}^{1,5} \text{ Bo}_c^{1,44} \text{ Ja}_c} \quad (4.24)$$

A Eq. 4.24 mostra que os efeitos do empuxo, tensão superficial e transferência de calor tem influência direta sobre a frequência de ocorrência do GB. Essa equação é válida para a região de GB e apresenta uma frequência que varia inversamente em relação a amplitude. Isto é, em baixas amplitudes (maior temperatura de vapor) a frequência de GB aumenta.

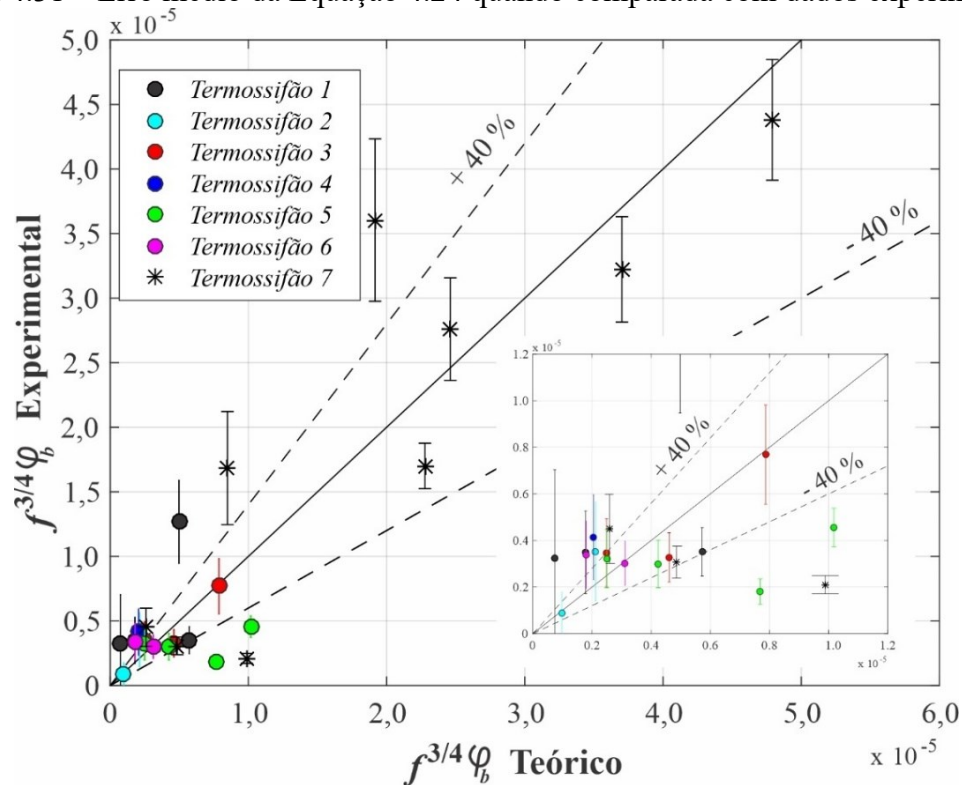
A Figura 4.30 mostra a relação entre a frequência e a amplitude de GB em função da temperatura de vapor para todos os dados experimentais obtidos para todos os termossifões estudados durante a operação em GB. A linha tracejada em vermelho mostra a correlação dada pela Eq. 4.24, onde se observa que, para baixas temperaturas de vapor, os resultados entre 20°C a 40°C foram melhor representados pela relação entre amplitude e frequência. Já para a faixa de temperatura entre 40°C e 60°C, se observou uma maior dificuldade para representar os valores de frequência e amplitude de GB. Finalmente, para os valores de alta temperatura, principalmente observado para o termossifão 7, o modelo conseguiu retratar bem a relação entre frequência e amplitude de GB, com alguns casos isolados com maiores erros.

Figura 4.30 – Comparação entre dados experimentais e modelo proposto para frequência e a amplitude de GB em função da temperatura de vapor.



O erro médio da Eq. 4.24 é apresentado na Figura 4.31, onde são comparados os dados experimentais com a correlação proposta. Observa-se erros menores do que 40%. Também foi observado que as maiores discrepâncias aconteceram para baixos valores de frequência e amplitude de GB, sendo que as maiores variações são correspondentes a faixa de 40°C a 60°C, onde o termossifão 5 apresentou maior desvio.

Figura 4.31 – Erro médio da Equação 4.24 quando comparada com dados experimentais.



4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo de caracterização do fenômeno GB em termossifões operando com um e dois fluidos a diferentes razões de enchimento, o fator de enchimento influencia na formação do *Geyser Boiling*, sendo observadas duas situações. A primeira está relacionada ao uso de um único fluido de trabalho no dispositivo (para esse caso, foi utilizado água destilada). Para essa situação, a altura da coluna de líquido está diretamente associada a intensidade do fenômeno, isto é, quanto maior a pressão hidrostática imposta pela piscina de líquido, maior é a amplitude do GB. A segunda situação está relacionada ao dispositivo operando com dois fluidos de trabalho insolúveis (nesse estudo, os fluidos de trabalho foram água destilada e óleo térmico). Nesse caso, pequenas camadas de óleo tem um comportamento similar a uma

“membrana”, observando-se que para fatores de enchimento menores a 20% de óleo a amplitude do fenômeno foi intensificada. Por outro lado, fatores de enchimento maiores a 20% de óleo reduz o “efeito membrana”, de modo, que a pressão hidrostática se torna mais significativa, comportando-se de forma similar aos termossifões que operam só com um único fluido de trabalho.

Outro aspecto analisado foi o desempenho do dispositivo durante o regime de GB, sendo observados dois regimes: alto desempenho (caracterizado pela baixa resistência térmica) e baixo desempenho (com alta resistência térmica). Esses regimes estão relacionados às amplitudes de variações de temperatura que ocorrem durante o GB. Foi observado que os dispositivos que apresentaram as maiores amplitudes foram os que possuíram maiores resistências térmicas. Também, foi observado que o desempenho do termossifão foi afetado com a diminuição da temperatura de resfriamento do condensador, tendo uma diminuição da sua capacidade de transferência de calor. Por outro lado, o desempenho do dispositivo sobe com o aumento da taxa de transferência de calor.

Além disso, foi observado que o fenômeno de GB está associado ao número de Reynolds. Para Reynolds maiores que 4, o dispositivo opera na condição ideal, para Reynolds menores do que 2 o dispositivo opera no regime de GB, e para Reynolds entre 2 e 4, o dispositivo pode apresentar GB ou não, sendo esse caracterizado como regime de transição. O mesmo foi observado para o número de Jakob corrigido, onde valores menores que 5000 correspondem ao regime ideal de operação, e valores maiores que este, ao regime de GB. Foi observado também que o número de confinamento está relacionado ao número de Jakob corrigido, e que o aumento de um desses parâmetros implica no aumento do outro. Deste modo, para o regime ideal de operação do termossifão (região onde o número de Jakob corrigido é menor) o diâmetro de partida de bolha tende a apresentar valores menores do que o regime de GB.

Finalmente, foi apresentado um modelo para prever a amplitude de GB, que apresentou um erro com relação aos dados experimentais menor que 25%, onde maiores erros foram observados principalmente nos termossifões 1, 4 e 7. Já o modelo teórico para a frequência de GB apresentou um erro menor do que 40% com relação aos dados experimentais. Também foi observado que as maiores discrepâncias aconteceram para baixos valores de frequência e amplitude de GB, sendo que as maiores variações são correspondentes a faixa de 40°C a 60°C, onde o termossifão 5 apresentou maior desvio.

5 ESTUDO DE VISUALIZAÇÃO DO FENÔMENO DE *GEYSER BOILING*

Nesse capítulo são apresentados a bancada experimental, a metodologia e os resultados obtidos para o fenômeno *Geysers Boiling* (GB) num termossifão bifásico de vidro operando com dois fluidos de trabalho. O estudo teve como objetivo principal verificar a relação existente entre o local de formação da bolha geradora de GB e a amplitude do fenômeno (caracterizada pelo número adimensional N). Para isto, foi utilizado um termossifão de vidro, por permitir a visualização do local de nucleação das bolhas. Foram testadas diferentes taxas de transferência de calor no evaporador, enquanto o condensador foi mantido na condição de convecção natural com o ambiente.

Assim como no estudo apresentado anteriormente com termossifão de aço, nesse estudo, os fluidos de trabalho escolhidos foram água destilada, responsável pelo transporte de calor, e óleo térmico (LUBRAX UTILE OT32) que cumpre o papel de agente controlador do fenômeno *Geysers Boiling*. As propriedades físicas dos fluidos de trabalho estudados são apresentadas no Apêndice A. Maiores detalhes de cada um dos estudos experimentais são relatados a seguir.

5.1 BANCADA EXPERIMENTAL

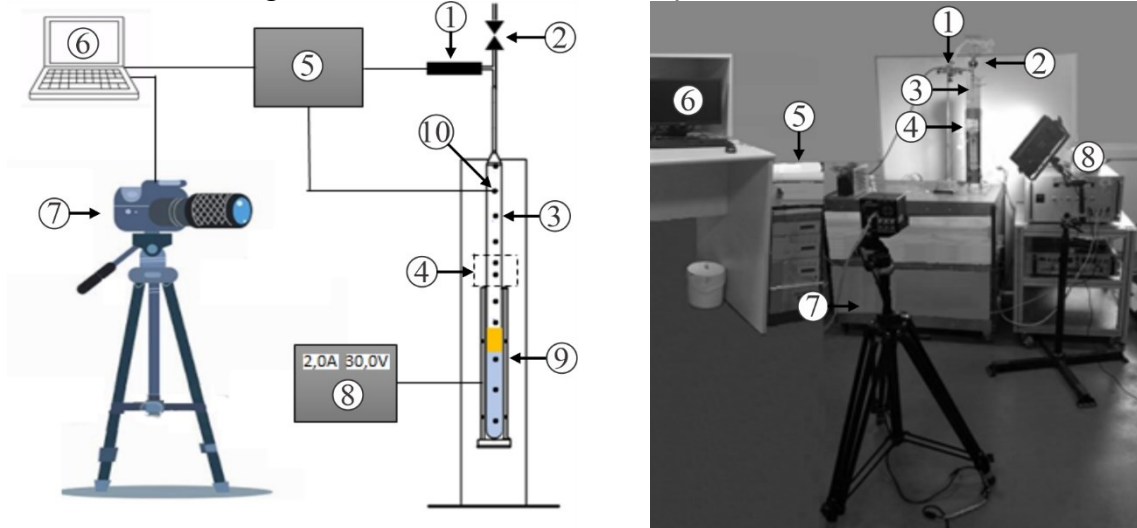
A bancada experimental utilizada para o estudo de visualização do fenômeno de GB em termossifões operando com dois fluidos de trabalho é apresentada na Figura 5.1, na qual, é exibida uma representação esquemática (Fig. 5.1a) e uma fotografia da bancada (Fig. 5.1b). Os componentes da bancada são: (1) sensor de pressão, (2) válvula, (3) termossifão, (4) manta de isolamento térmico, (5) sistema de aquisição de dados, (6) computador, (7) câmera de alta velocidade, (8) fonte de alimentação, (9) aquecedor do tipo meia calha, e (10) termopar.

O termossifão estudado foi fabricado com vidro e possui um diâmetro externo de 22,23 mm e uma espessura de parede de 1,6 mm. O comprimento total do termossifão foi de 400 mm, onde as seções do evaporador, adiabática e condensador possuem, respectivamente, os comprimentos 250 mm, 50 mm e 100 mm (Figura 5.2).

O calor foi fornecido ao termossifão através de um aquecedor do tipo meia calha, de maneira a deixar descoberta metade do evaporador na direção circunferencial, de modo a permitir a visualização do fluido de trabalho durante a operação. O aquecedor era composto por uma resistência tipo cartucho de 35 Ω , inserida dentro de um bloco de alumínio, como mostra

a Fig. 5.2. A dissipação do calor foi via convecção natural entre as paredes do condensador e o ambiente.

Figura 5.1 – Bancada de visualização do fenômeno GB.

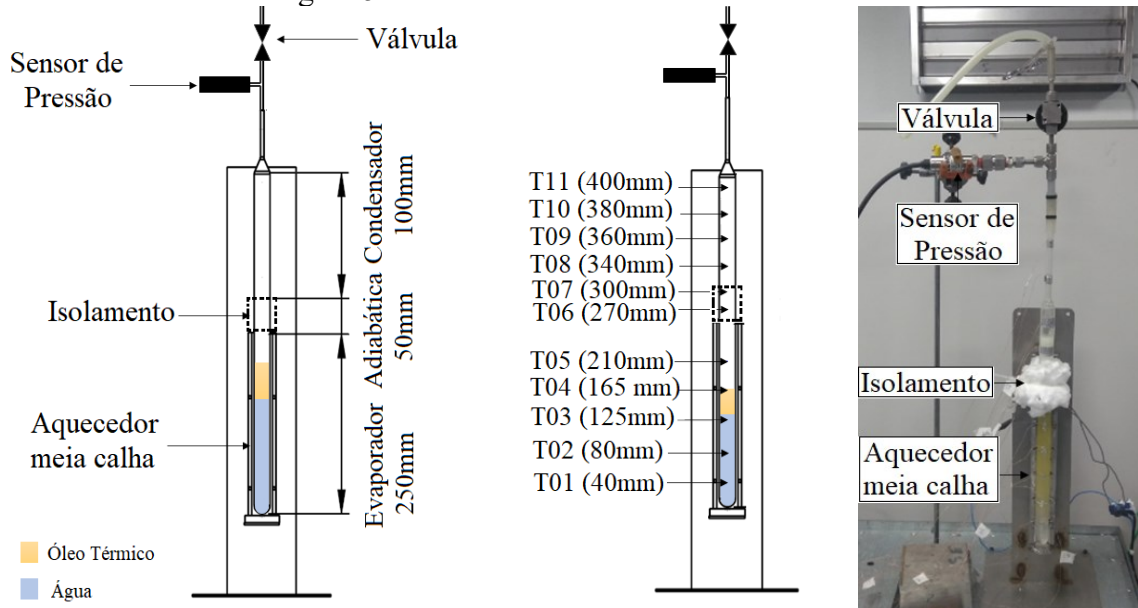


a) Representação esquemática.

b) Bancada experimental.

(1) Sensor de pressão; (2) Válvula; (3) Termossifão; (4) Manta de isolamento térmico; (5) Sistema de aquisição de dados; (6) Computador; (7) Câmera de alta velocidade; (8) Fonte de alimentação; (9) Aquecedor meia calha; (10) Termopar.

Figura 5.2 – Bancada do termossifão de vidro.



a) Representação esquemática do dispositivo.

b) Disposição dos termopares.

c) Bancada experimental.

Óleo Térmico
Água

T11 (400mm)
T10 (380mm)
T09 (360mm)
T08 (340mm)
T07 (300mm)
T06 (270mm)
T05 (210mm)
T04 (165 mm)
T03 (125mm)
T02 (80mm)
T01 (40mm)

O termossifão de vidro foi instrumentado com termopares do tipo “K” (cromel – alumel), de alta pureza e bitola AWG36, montados ao longo do dispositivo. Cinco termopares foram montados na seção do evaporador, quatro termopares foram montados na seção do condensador e dois termopares foram montados na seção adiabática e isolados termicamente com lã de vidro (Fig. 5.2b). Além disso, foi utilizado um sensor de pressão da marca Omega, modelo PX409-050 AV (Fig. 5.2c), com o objetivo de registrar a pressão interna no termossifão durante a operação e verificar a ocorrência do *Geysier Boiling* segundo a metodologia apresentada por Pabón *et al.* (2019), este componente é do tipo piezorresistivo sendo específico para intervalos de pressão de vácuo, seu tempo de resposta é inferior a 1ms e sua faixa de medição vai de 0 bar a 3,4 bar (340 kPa). As medições foram coletadas através de um sistema de aquisição de dados da marca *Campbell Scientific* a partir de um módulo CR1000 e de um multiplexador AM25T com taxa de aquisição de 1 segundo. Para observar visualmente o fenômeno de GB foi utilizada uma câmera de alta velocidade modelo *Photron Fastcam Mini UX50*.

5.2 METODOLOGIA

Como mencionado anteriormente, este estudo experimental teve como objetivo principal verificar a relação entre o local de formação da bolha geradora de GB e a amplitude do fenômeno. Para isto, foi utilizado um termossifão de vidro, onde foram impostas diferentes taxas de transferência de calor no evaporador, mantendo o condensador na condição de convecção natural com o ambiente.

Desse modo, buscou-se a caracterização da amplitude a partir da variação dos seguintes parâmetros: razão entre os fatores de enchimento dos dois fluidos de trabalho e a taxa de transferência de calor fornecida no evaporador. Para esse estudo foram adotados os procedimentos descritos abaixo.

5.2.1 Carregamento

O carregamento do termossifão com dois fluidos de trabalho foi realizado através das seguintes etapas:

- a) Limpeza: o tubo foi limpo com água, detergente, álcool isopropílico e acetona, segundo a metodologia proposta por Mantelli (2013);

- b) Desgaseificação e vácuo do tubo: o tubo foi colocado durante 1 hora numa bomba de anel líquido modelo BVMII-156/60, com o objetivo de retirar as gotículas de líquido (como: água, álcool isopropílico e acetona) provenientes da limpeza do termossifão. Além disso, este processo serve de pré-vácuo, onde o tubo consegue atingir pressões na ordem de 10^{-3} mbar. Posteriormente é realizado um vácuo de melhor qualidade em um sistema de bombas de alto vácuo. Neste sistema o vácuo é feito por duas bombas, uma mecânica e uma difusora. A bomba mecânica da marca Franklin Electric, modelo 1201006405, é responsável por um vácuo primário, da ordem de 10^{-4} mbar. Ao atingir esse vácuo, a bomba mecânica é desligada e a bomba difusora, modelo Edwards Diffstak 160 MM, entra em operação. A bomba difusora consegue estabelecer vácuos da ordem de 10^{-6} mbar. O vácuo é monitorado por dois sensores, de baixo e alto vácuo, modelos Edwards APG-M-NW16 e AIM-S-NW25, respectivamente;
- c) Desgaseificação dos fluidos de trabalho: os fluidos de trabalho foram colocados em duas buretas graduadas independentes, as quais foram conectadas a uma bomba de anel líquido com o objetivo de retirar os gases ou vapores presentes nos fluidos de trabalho;
- d) Carregamento: após a desgaseificação dos fluidos de trabalho, as buretas são conectadas no tubo com mangueiras de silicone, seguindo o procedimento de carregamento por vácuo apresentado por Mantelli (2013). Primeiro é carregado o tubo com o fluido de trabalho primário, isto é, a água destilada, e posteriormente é inserido o fluido secundário, ou seja, o óleo térmico. É importante destacar que durante todo o procedimento de carregamento, o vácuo no tubo é mantido aos níveis obtidos no sistema de bombas de alto vácuo. A Tabela 5.1 apresenta a quantidade de cada fluido inserida no tubo, assim como o fator de enchimento de cada um dos fluidos (F_1 para o fluido primário e F_2 para o fluido secundário). Neste trabalho o fator de enchimento é definido como a razão entre o volume total de fluido e o volume total do evaporador do termossifão.

Tabela 5.1 – Razões de enchimento para o termossifão de vidro.

	Água destilada (F_1)	Óleo térmico (F_2)
Razão de Enchimento (Volume)	60% (43 ml)	0% (0 ml)
	60% (43 ml)	20% (14 ml)
	60% (43 ml)	40% (29 ml)

5.2.2 Procedimento experimental

Como mencionado anteriormente, para verificar a relação que existe entre o local de formação da bolha geradora de GB e a amplitude do fenômeno em função da razão entre os fatores de enchimento dos fluidos de trabalho, foram testados os fatores de enchimento dos fluidos secundário e primário apresentadas na Tab. 5.1. Para estas combinações de fatores de enchimentos foram testadas as seguintes taxas de transferência de calor: 25 W para a proporção 60% água e 0% óleo; 25 W e 100 W para 60% água e 40% óleo, e 40 W para 60% água e 20% óleo.

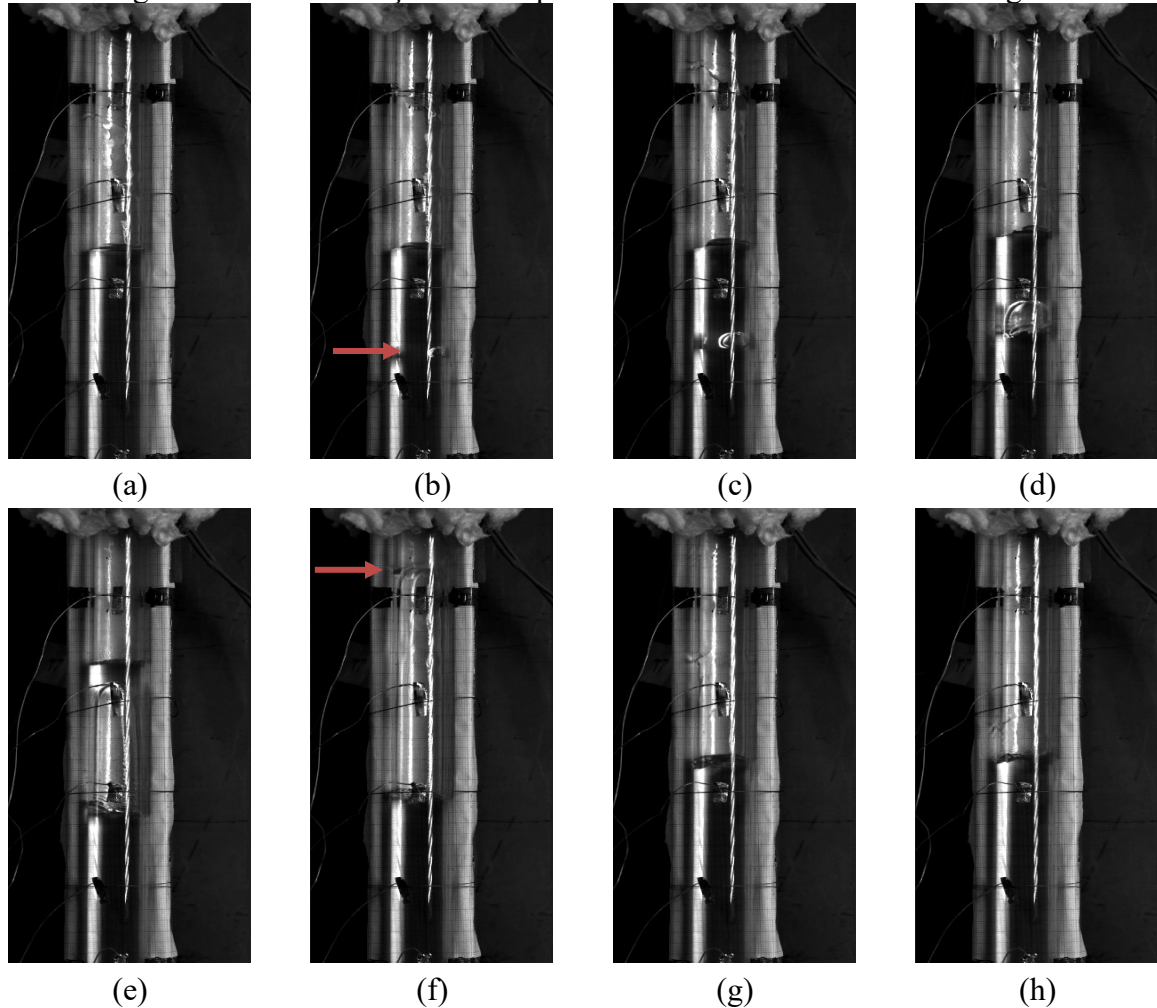
Os testes experimentais se iniciaram com o dispositivo na temperatura ambiente. Em seguida foi imposto ao evaporador a taxa de transferência de calor pré-definida. A câmera de alta velocidade foi posicionada a 1 m do termossifão de vidro. As taxas de quadros por segundos utilizadas foram: 1000 fps, 4000 fps, 5120 fps e 8000 fps e o tempo de aquisição de dados para essas quatro taxas foram, respectivamente, 2,18 s, 1,10 s, 1,47 s e 0,94 s. A escala de medição adotada no experimento foi estimada através de uma folha de papel milimetrado colocada atrás do termossifão. Desta forma, a resolução da medição corresponde a resolução do papel milimetrado, ou seja $\pm 0,5$ mm.

5.3 ESTUDO DE VISUALIZAÇÃO DO *GEYSER BOILING*

Para se obter um melhor entendimento qualitativo dos fenômenos físicos e como ocorrem as variações de amplitude de GB, recorre-se à visualização em um termossifão de vidro. Conforme já apresentado no capítulo anterior, o fenômeno acontece de maneira cíclica, sendo cada ciclo marcado por estágios bem definidos. A Figura 5.3 apresenta um conjunto de fotografias que representam os estágios de formação do GB em um termossifão bifásico, no

qual, utiliza água destilada como fluido de trabalho e opera com um fator de enchimento de 60% a uma taxa de transferência de calor de 25 W.

Figura 5.3 – Visualização do GB para o fator de enchimento de 60% água.

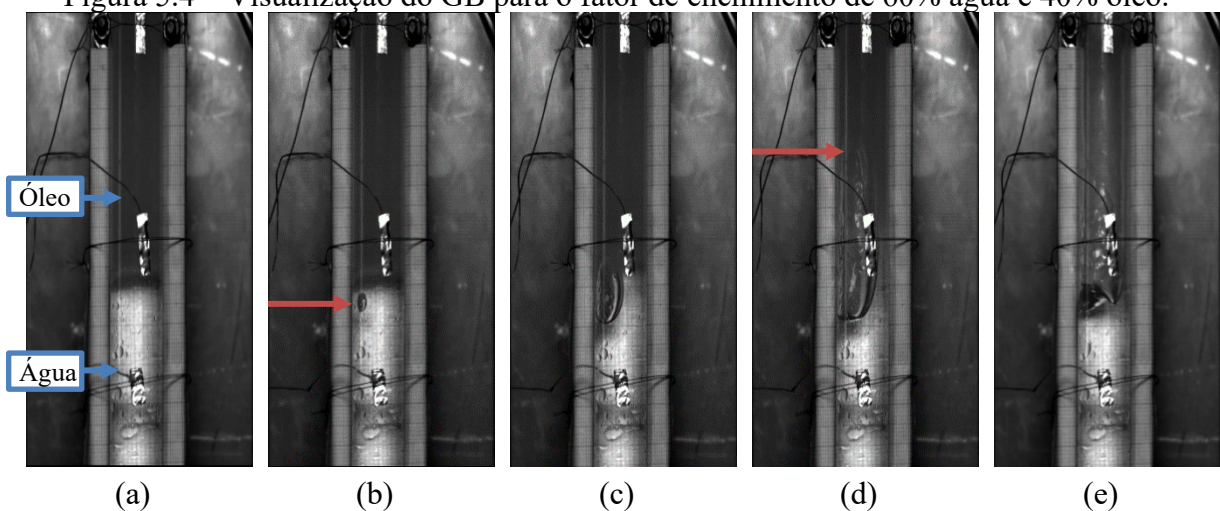


O estágio de formação do GB inicia-se com a piscina líquida do fluido de trabalho em repouso (Fig. 5.3a), que recebe energia térmica proveniente do evaporador. A piscina começa a armazenar energia de modo a entrar em um estado de metaestabilidade, no qual, uma perturbação pode desencadear a liberação dessa energia. O contínuo acréscimo de calor favorece o surgimento de um sítio de nucleação ativo (apresentado pela seta da Fig. 5.3b) que dá origem a uma bolha. Inicialmente, o crescimento da bolha é dominado pela evaporação e com a intensificação do seu desenvolvimento, o efeito inercial passa a favorecer o crescimento da bolha (Fig. 5.3c) fazendo com que o líquido se desloque "puxe" a interface da bolha e, à medida que ocorre o seu crescimento (Fig. 5.3d e Fig. 5.3e) favorecido pela transferência de

calor, o efeito viscoso do fluido passa a influenciar no acúmulo de energia da bolha. Nas Figuras 5.3d e 5.3e pode-se notar um leve afastamento da bolha do seu sítio de nucleação, sendo motivada pela força de empuxo. O crescimento da bolha acontece até ela atingir a interface líquido-vapor da piscina. Esse é o momento em que a bolha alcança sua amplitude máxima de crescimento (apresentado pela seta da Fig. 5.3f). Após alcançar a interface, a bolha explode, pulverizando vapor saturado e parte do líquido arrastado sobre as paredes do condensador. Devido ao efeito gravitacional, o fluido pulverizado retorna ao evaporador (Fig. 5.3g) já com uma temperatura mais baixa, resfriando a piscina de líquido. Por fim, o fluido de trabalho entra em um período de repouso (Fig. 5.3h). Após esse período, que pode variar dependendo das condições em que o termossifão é submetido, o dispositivo recomeça o ciclo de GB. O inverso do período de tempo desde o repouso até o momento de estouro da bolha formadora do fenômeno, é denominado por frequência de GB.

Esse mesmo comportamento acontece de forma similar quando se utiliza água destilada e óleo térmico como fluidos de trabalho, no qual, estão presentes os mesmos estágios do ciclo de GB, como pode ser observado na Figura 5.4. Os fluidos iniciam em repouso (Fig. 5.4a), o acréscimo de calor propicia a formação de uma bolha (seta da Fig. 5.4b) que cresce e se expande (Fig. 5.4c) até atingir uma amplitude máxima (seta da Fig. 5.4d) e a bolha explode pulverizando vapor saturado e líquido sobre as paredes do condensador, o efeito gravitacional faz com que o líquido retorne ao evaporador, reiniciando novamente o ciclo (Fig. 5.4e).

Figura 5.4 – Visualização do GB para o fator de enchimento de 60% água e 40% óleo.

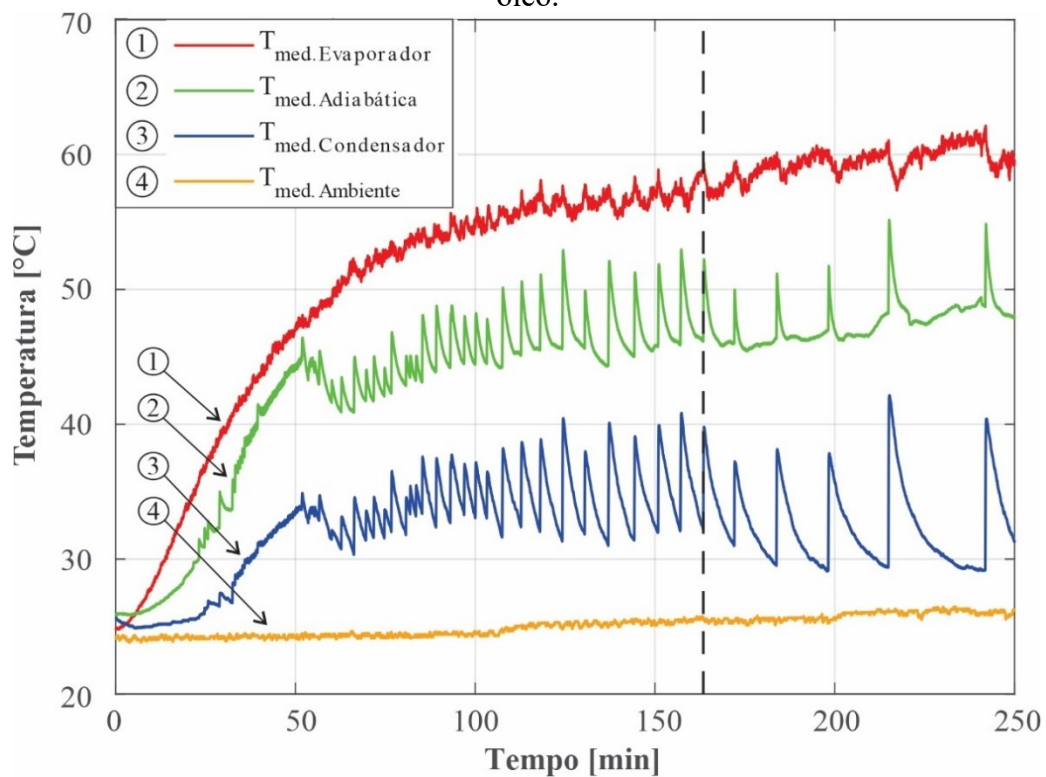


Conforme já mencionado anteriormente, durante o regime de GB, as amplitudes associadas a cada ciclo estão relacionadas às condições em que o dispositivo é submetido. Com o intuito de tentar entender melhor as variações que ocorrem nessas amplitudes, esse estudo

buscou analisar melhor o regime de operação do termossifão bifásico que opera com óleo térmico e água destilada.

A Figura 5.5 mostra o gráfico das temperaturas médias do evaporador (linha 1), da seção adiabática (linha 2) e do condensador (linha 3) do termossifão de vidro, além da temperatura média do ambiente (linha 4). Os fluidos de trabalho e as razões de enchimento utilizadas nesse experimento foram 60% de água destilada e 40% de óleo térmico, e taxa de transferência de calor de 25 W.

Figura 5.5 – Temperaturas médias do termossifão de vidro que opera com 60% água e 40% óleo.

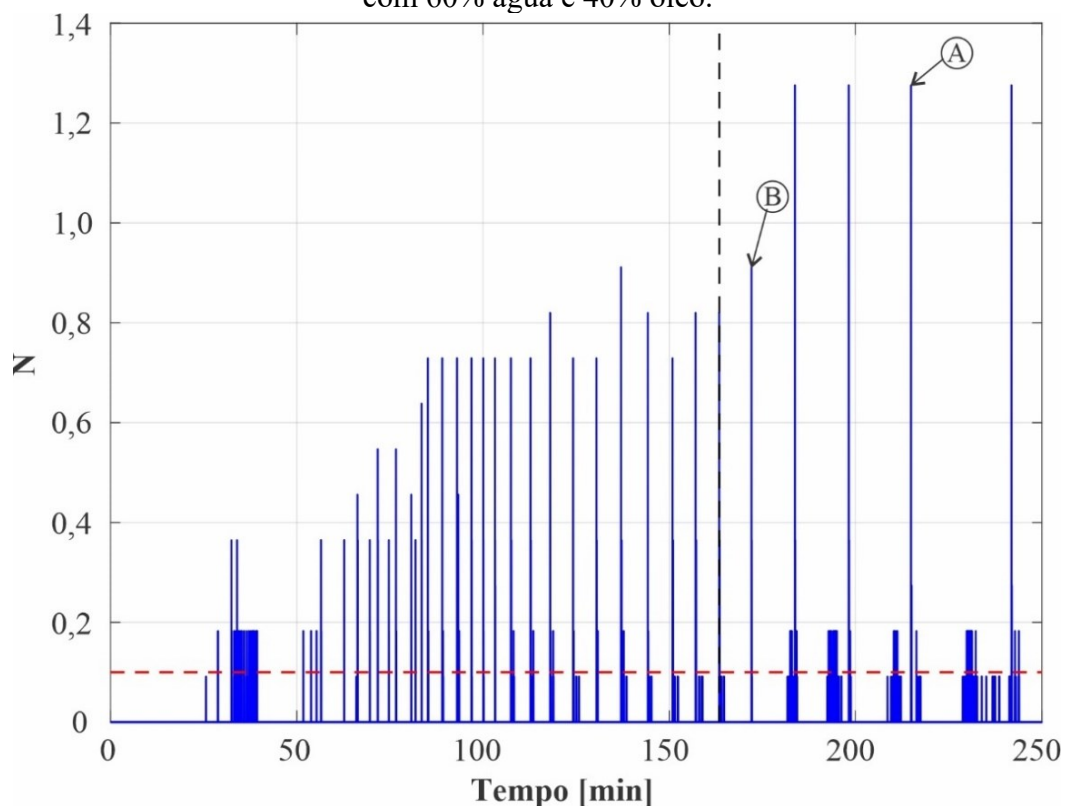


A Figura 5.5 é marcada por grandes oscilações cíclicas de temperatura, que são características do fenômeno *Geysier Boiling*. Observa-se que, durante a operação do dispositivo, essas oscilações possuem diferentes comportamentos para amplitude e frequência em regime transiente e, ao se atingir o regime permanente, (linha vertical tracejada representa a mudança de um regime para outro) o fenômeno apresentou menores variações de amplitude, e frequências mais ordenadas. A grande dificuldade de analisar esses parâmetros a partir de medidas de temperatura se deve ao fato de o material do tubo ser o vidro, que apresenta baixa

difusividade térmica e provoca um atraso nas variações de temperatura quando comparadas com o interior do tubo.

Desse modo, esses comportamentos foram avaliados através das variações de pressão ocorridas no interior do dispositivo. Para a mesma condição analisada anteriormente, foi utilizado o número N definido por Pabón *et al.* (2019) (Eq. 2.1) e apresentado no gráfico da Figura 5.6, no qual, valores maiores do que 0,1 (linha tracejada na horizontal) indica a ocorrência de *Geysier Boiling*.

Figura 5.6 – Número N em função do tempo para o teste com termosifão de vidro carregado com 60% água e 40% óleo.

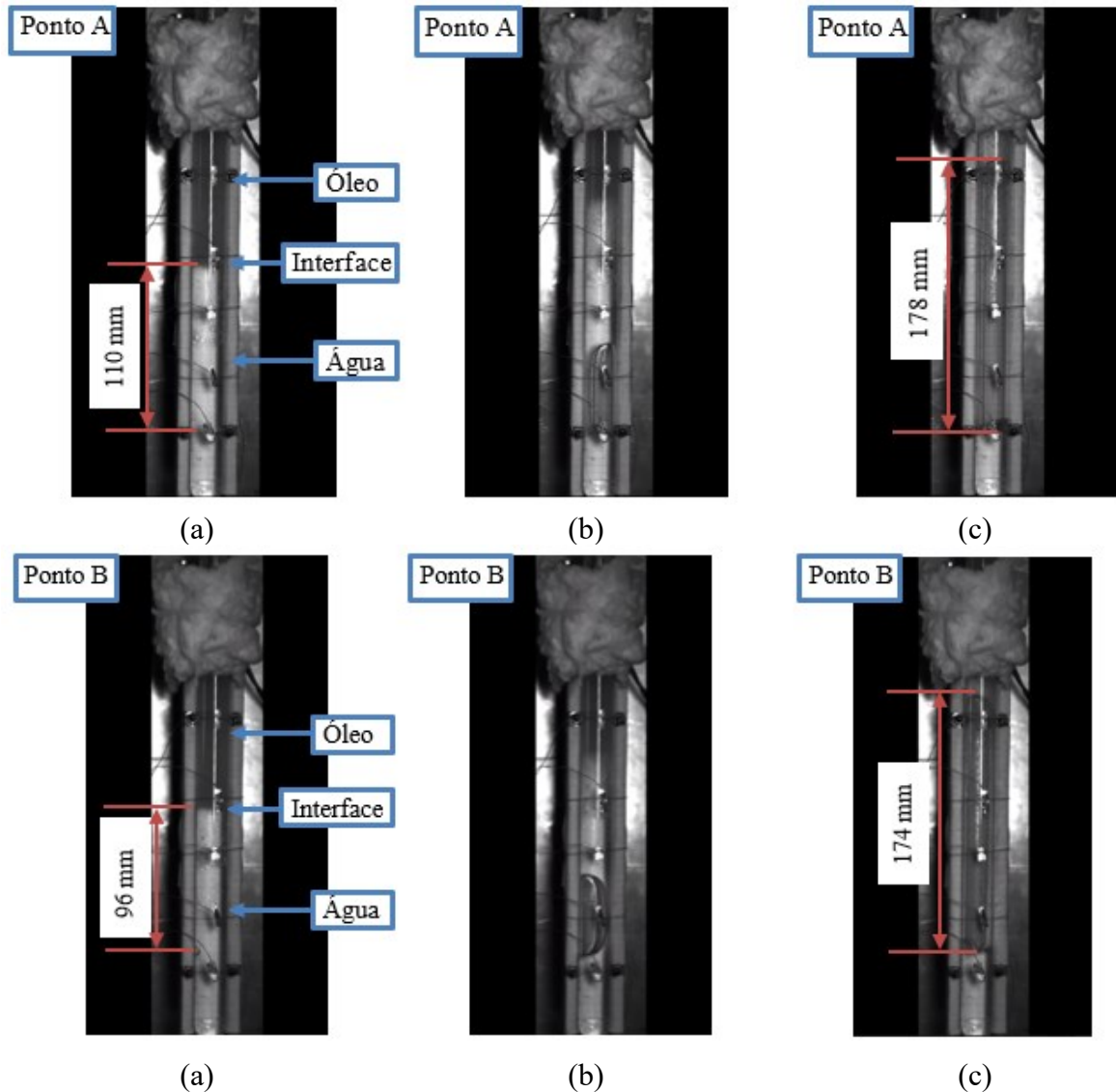


Na Figura 5.6, observa-se que os valores associados a N (maiores do que 0,1), antes de atingir o regime permanente (linha vertical tracejada) variam, apresentando menores amplitudes de N e maiores frequências inicialmente e, ao atingir o regime permanente, as amplitudes de N foram maiores e as frequências menores. Isso mostra que o GB apresenta diferentes comportamentos antes de ser atingido o regime permanente de operação.

Além disso, observou-se através da visualização do fenômeno GB, que as amplitudes do número N se relacionam com o local de surgimento da bolha (sítio de nucleação). Isso pode ser constatado ao se associar, para a mesma condição anterior, a visualização do fenômeno

(Figura 5.7) com os pontos A e B da Fig. 5.6, onde as amplitudes do número N foram, respectivamente, de 1,27 e 0,91. A temperatura de operação do termossifão era constante (como observado na Fig. 5.5), com o dispositivo operando em regime permanente.

Figura 5.7 – Pontos de formação da bolha para 60% água e 40% óleo.



O ponto A da Fig. 5.6 é representado na sequência de imagens da Fig. 5.7a a Fig. 5.7c, onde se observa o local em que a bolha nasce. A água destilada está na região inferior do tubo com uma coloração clara e o óleo térmico logo acima, com uma coloração opaca. Com o seu sítio de nucleação posicionado a 110 mm da interface água-óleo (Fig. 5.7a), o crescimento da bolha é apresentado na Fig. 5.7b, e a amplitude de crescimento na Fig. 5.7c, onde alcançou 178 mm. Já o ponto B da Fig. 5.6 é representado na sequência de imagens da Fig. 5.7d à Fig.

5.7f, na qual, a distância do local de formação da bolha à interface água-óleo é de 96 mm (Fig. 5.7d). O crescimento da bolha é apresentado na Fig. 5.7e e a amplitude de crescimento (Fig. 5.7f) foi de 174 mm.

Deste modo, as bolhas que se formam mais longe da interface água-óleo geram maiores amplitudes de N . Vale a pena destacar que, para o crescimento máximo da bolha, a análise fica comprometida. Isso porque nem sempre é possível de ser determinado, pois em alguns momentos, o tamanho da bolha fica limitado as dimensões do tubo, e em outros, a visualização se torna impossibilitada pela manta de isolamento térmico (seção adiabática), que funciona como controle e segurança do experimento.

Além disso, como foi mencionado anteriormente, no regime transiente, a intensidade do GB varia como pode ser observado no gráfico da Fig. 5.6. Para o regime permanente, a medida em que se aumenta a intensidade do GB (retratado pelo número N) a distância do sítio de nucleação à interface água-óleo também aumenta.

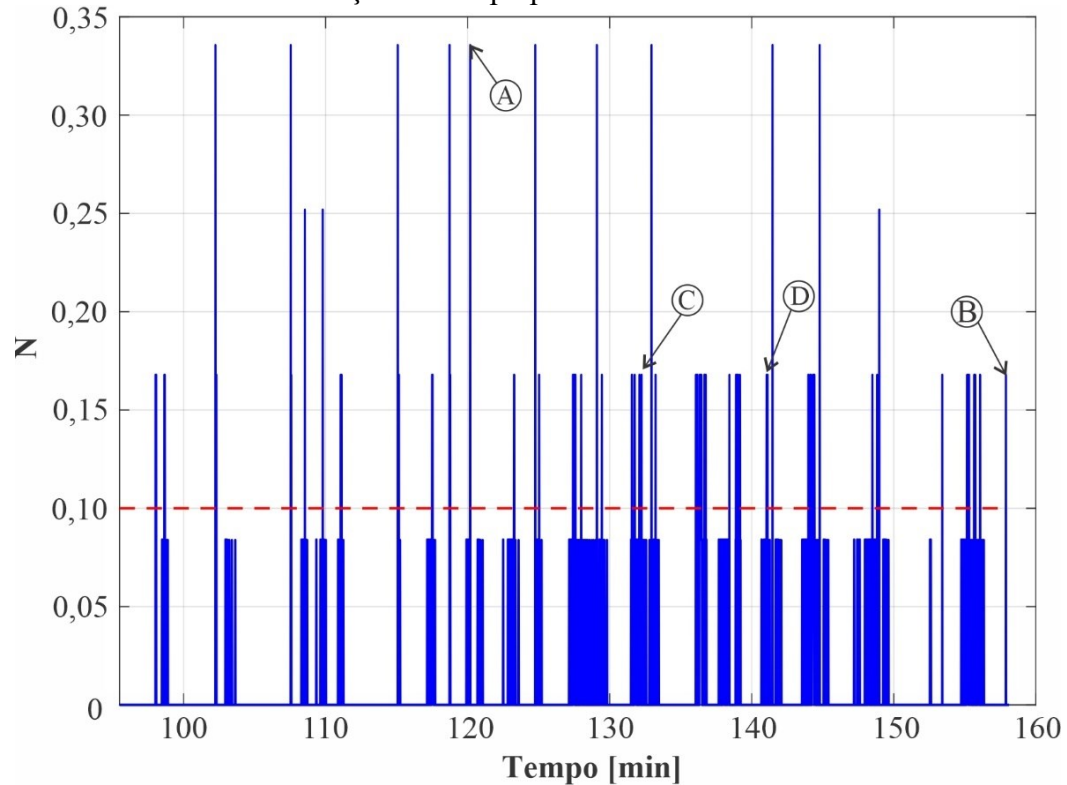
Esse mesmo comportamento do GB foi observado para o regime transiente, onde as bolhas apresentam uma maior probabilidade de se formarem próximas à interface água-óleo, possuindo menor intensidade de N . Quando o dispositivo ganha energia e entra no regime permanente, as bolhas tendem a se distanciar da interface produzindo maiores amplitudes de N .

Com o objetivo de analisar se os comportamentos observados até o momento estão associados apenas ao uso de óleo, observou-se um termossifão com 60% água e 0% óleo, verificando se a intensidade do GB (número N) depende da posição em que a bolha é formada. Para isso, foi empregada uma taxa de transferência de calor de 25 W e uma condição de resfriamento do condensador por convecção natural. Verificou-se, para a condição de regime permanente do dispositivo, que existe amplitudes maiores e amplitudes menores para o número N (como pode ser observado na Figura 5.8) e que essas variações estão relacionadas ao local de formação da bolha.

Na Figura 5.8 é apresentado o número N em função do tempo, onde os pontos A e B da figura representam uma condição de GB ($N > 0,1$), com a amplitudes do número N de, respectivamente, 0,34 e 0,17.

O ponto A da Fig. 5.8 é representado na sequência de imagens da Figura 5.9a a Figura 5.9c, e o ponto B na sequência de imagens da Figura 5.9d a Figura 5.9f. Para essa análise, é considerado como interface a região entre o líquido e o seu próprio vapor no estado de saturação.

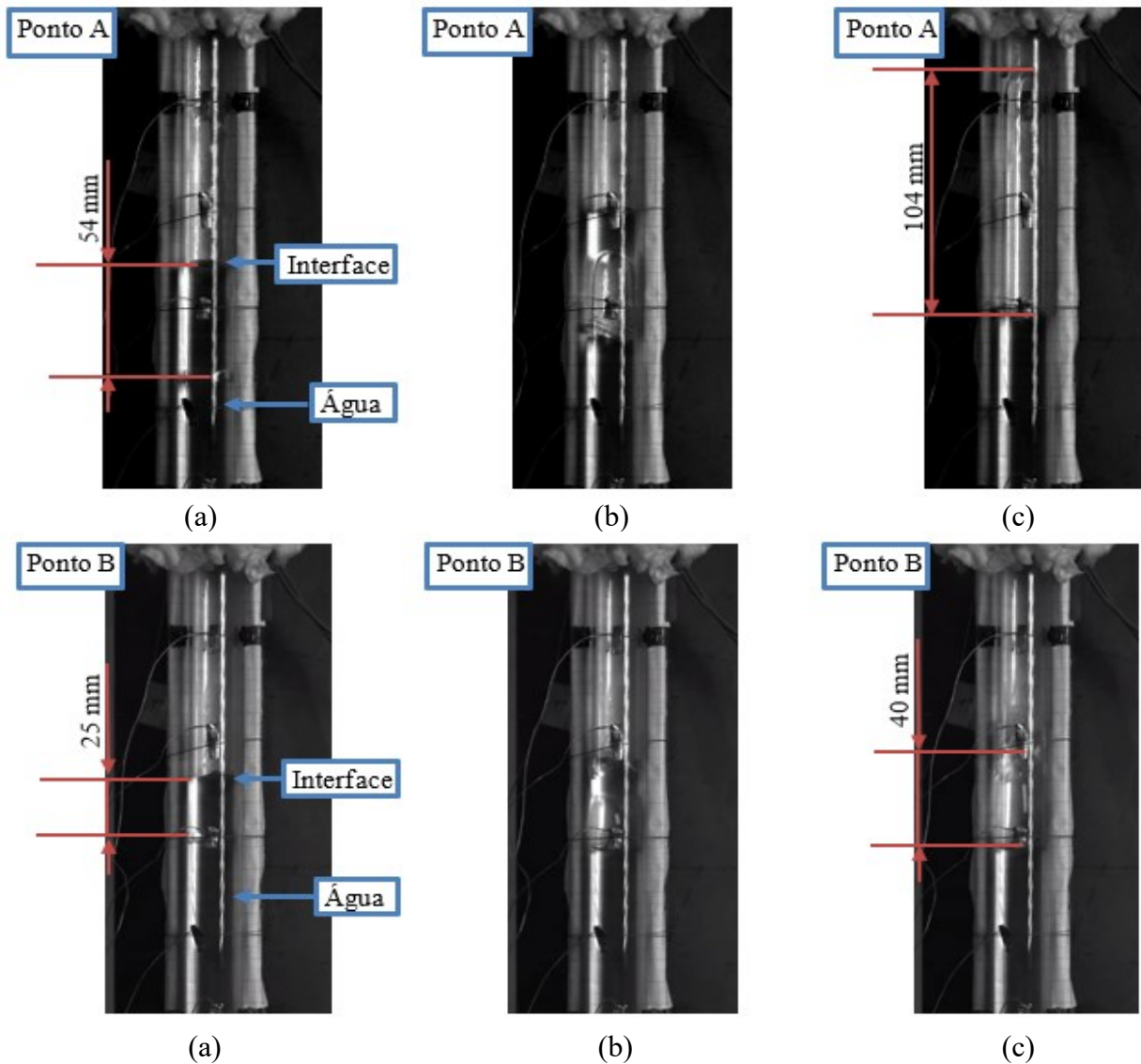
Figura 5.8 – Número N em função do tempo para o termosifão de vidro com 60% de água.



Para o ponto A, a bolha se formou a 54 mm da interface (Fig. 5.9a) e o seu crescimento (Fig. 5.9b) alcançou uma amplitude de 104 mm (Fig. 5.9c). Já para o ponto B, a bolha se formou a 25 mm da interface (Fig. 5.9d) e o seu crescimento (Fig. 5.9e) alcançou uma amplitude de 40 mm.

Este efeito é consequência do fato de que o diâmetro de partida depende especialmente do balanço de forças que atua na bolha, de modo que a tensão superficial tenta manter a bolha presa à parede do evaporador e a força de empuxo empurra a bolha em direção à superfície da piscina líquida (CISTERNA et al., 2020a). Quando a bolha se forma em uma região distante da interface, essas forças tendem a ser maiores. Assim, quanto maior a piscina de líquido, mais energia é necessária para formar uma bolha de um certo diâmetro. Conseqüentemente, quando a bolha sobe, ela se expande mais rápido porque possui mais vapor. O diâmetro de partida se mantém constante para um local de formação fixo, desta forma, mais vapor precisa ser formado. Isso significa que bolha formada mais distante da interface tende a ficar maior, porque possui mais energia armazenada e por isso gera maior GB.

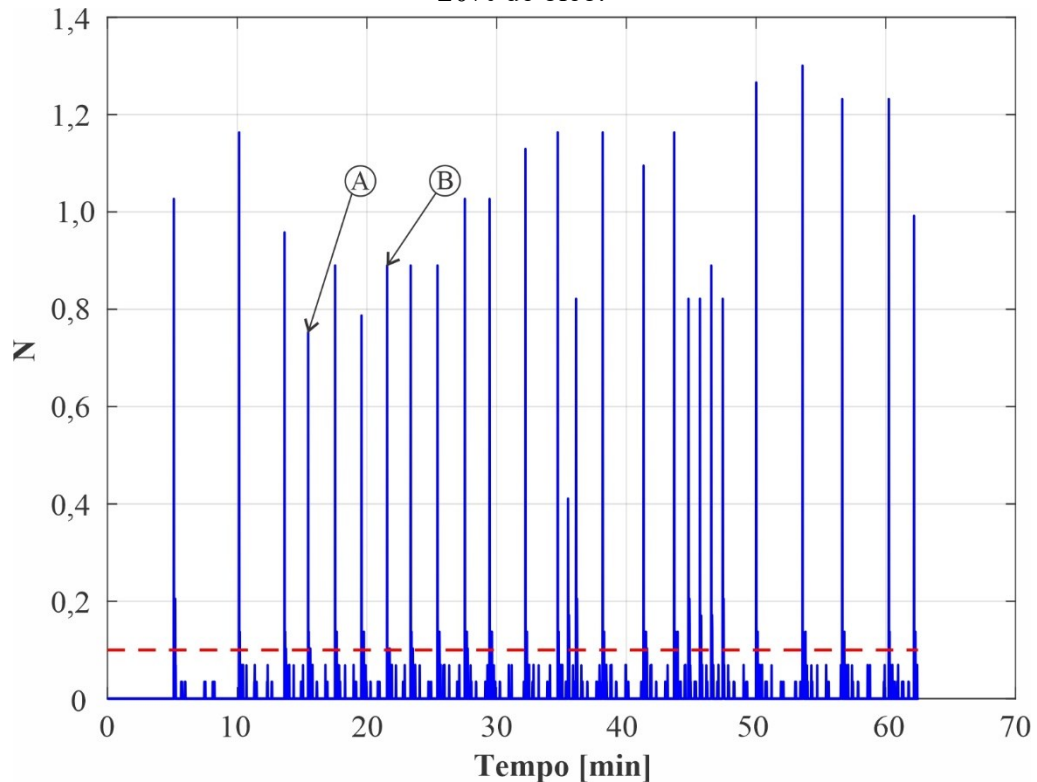
Figura 5.9 – Pontos de formação da bolha para 60% água.



Também foi realizado o mesmo experimento, porém foi utilizado 60% água e 20% óleo, com taxa de transferência de calor de 40 W. Para essas condições, foi observado que a intensidade do GB (número N) depende da posição em que a bolha é formada. Essa propriedade pode ser analisada a partir do gráfico da Fig. 5.10 para os pontos A e B, que possuem, respectivamente, os valores para N de 0,75 e 0,89, e a partir da Fig. 5.11.

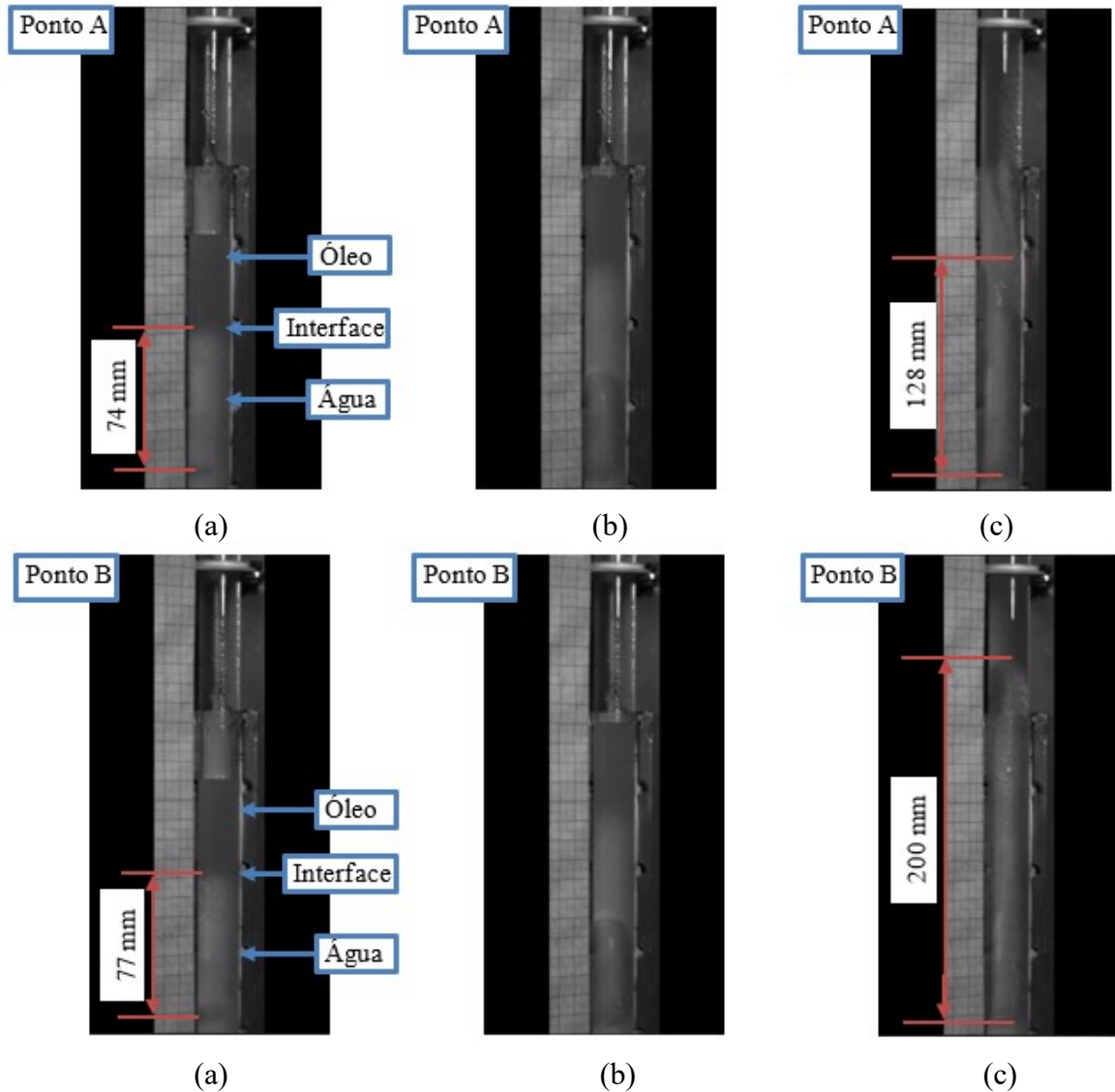
O ponto A da Fig. 5.10 é representado na sequência de imagens da Fig. 5.11a à Fig. 5.11c, enquanto o ponto B da Fig. 5.10, na sequência de imagens da Fig. 5.11d a Fig. 5.11f. Para o ponto A, a bolha se formou a 74 mm de distância da interface água-óleo (Fig. 5.11a) e o seu tamanho foi de 128 mm (Fig. 5.11c). Para o ponto B, a bolha se formou a 77 mm de distância da interface água-óleo (Fig. 5.11d) e o tamanho alcançado foi de 200 mm (Fig. 5.11f).

Figura 5.10 – Número N em função do tempo para o termossifão de vidro com 60% de água e 20% de óleo.



Assim, foi visto que existe uma relação entre o local de formação da bolha com a amplitude do número N . Esse fato pode ser constatado na Fig. 5.8 através dos pontos C e D, que correspondem a instantes diferentes de operação, porém com a mesma amplitude de N e distância do sítio de nucleação à interface o ponto B. Deste modo, analisando os dados para a proporção 60% de água e 20% de óleo (Fig. 5.10), em regime permanente, é possível estimar um valor de amplitude média para o número N igual a $0,99 \pm 0,20$, no qual, corresponde a uma provável formação do sítio de nucleação em relação a interface água-óleo na posição $66 \text{ mm} \pm 4 \text{ mm}$. Do mesmo modo, para os dados obtidos com a proporção 60% de água e 40% de óleo (Fig. 5.6), em regime permanente, o valor da amplitude média para o número N é igual a $1,14 \pm 0,21$ e a provável distância do sítio de nucleação a interface água-óleo é $103 \text{ mm} \pm 24 \text{ mm}$. Para os dados obtidos para a proporção 60% de água e 0% de óleo (Fig. 5.8), em regime permanente, o valor da amplitude média para o número N é igual a $0,23 \pm 0,08$ e a provável distância do sítio de nucleação a interface água-óleo é $36 \text{ mm} \pm 13 \text{ mm}$.

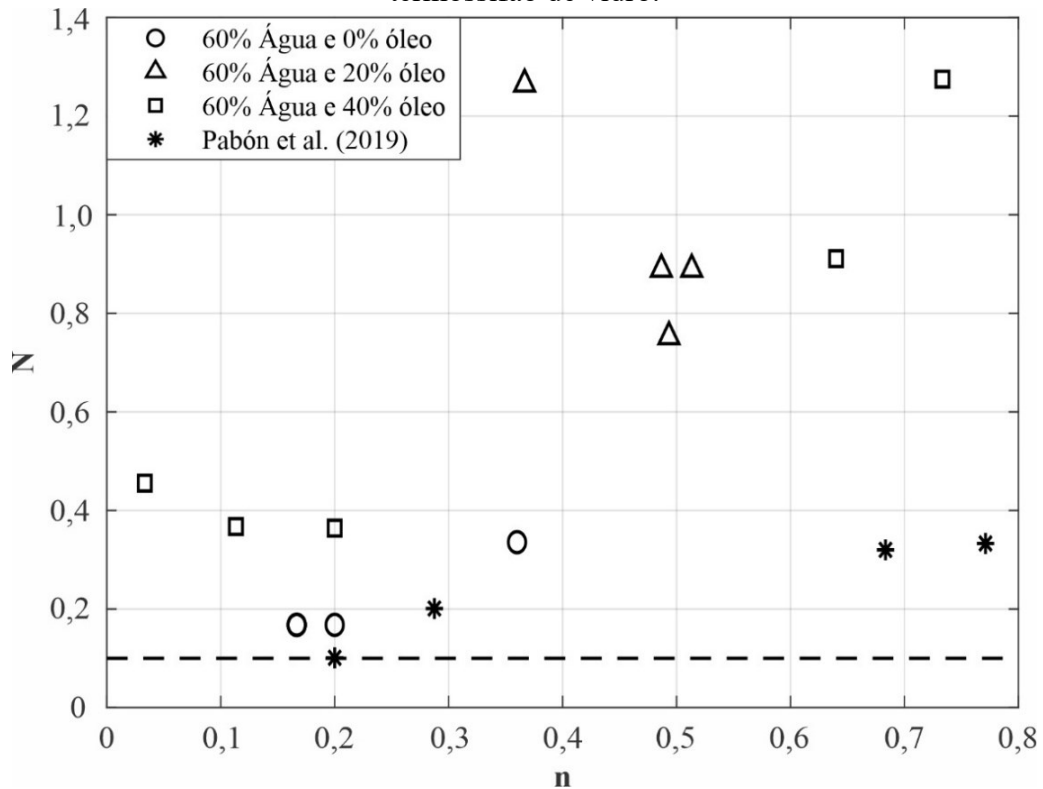
Figura 5.11 – Pontos de formação da bolha para o termossifão de vidro com 60% de água e 20% de óleo.



Além disso, quando analisado o número N em função do fator n (Figura 5.12), que representa a razão entre a distância do sítio de nucleação até a interface entre fluidos e a altura da coluna de água, observa-se que existe um padrão correspondente ao comportamento mencionado anteriormente, isto é, à medida em que se aumenta a distância do sítio de nucleação, maior é o número N .

Na Figura 5.12, são apresentados também os dados experimentais obtidos por Pabón *et al.* (2019). Estes autores colocaram uma fonte de calor pontual que dissipou 11 W para um termossifão com diferentes razões de enchimento do fluido de trabalho (água). Pabón *et al.* (2019) observaram que o fator n aumenta em conjunto com a amplitude do número N . Porém, constataram que existe um limite máximo para o aumento da amplitude do número N independentemente do aumento do fator n .

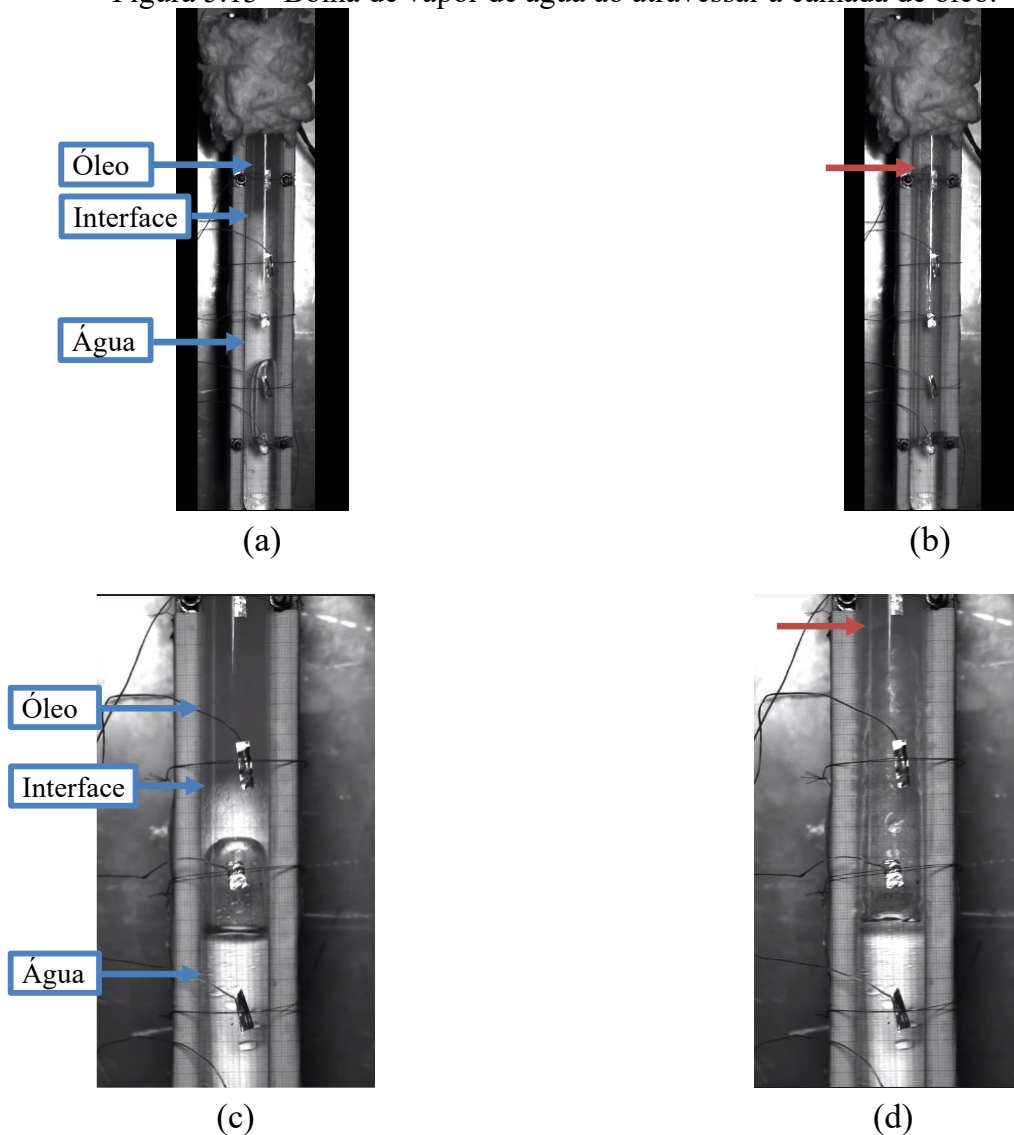
Figura 5.12 – Número N em função da distância do sítio de nucleação a interface para o termossifão de vidro.



Para a água destilada e o óleo térmico, o mesmo comportamento não foi observado. Apesar da amostra de dados não ser suficientemente grande tem-se que, à medida em que cresce o valor de n , a amplitude de N aumenta de maneira assintótica. Essa condição mostra que a utilização de dois fluidos de trabalho pode amplificar os efeitos de N .

Além do mais, existe outro fenômeno a se destacar nesse estudo de visualização, que é a dificuldade em que a bolha geradora de GB encontra para atravessar a camada de óleo, de modo que ela pode se romper antes ou na interface da camada de óleo. Na Figura 5.13 é apresentada uma sequência de figuras que representam o crescimento da bolha (Fig. 5.13a e Fig. 5.13c) e o momento em que ela se rompe antes (Fig. 5.13b, indicado pela seta) ou na interface (Fig. 5.13d, indicado pela seta). A ruptura da bolha antes de atingir a interface pode ser atribuída ao aumento abrupto do volume de vapor que ocorre durante o crescimento da bolha, de modo a desequilibrar o balanço de forças que atua na formação desta, de forma que a ruptura na interface pode ser vista como o momento em que ocorre uma mudança de tensão superficial na camada superior da bolha, alterando a estabilidade que existe em seu diâmetro.

Figura 5.13 –Bolha de vapor de água ao atravessar a camada de óleo.

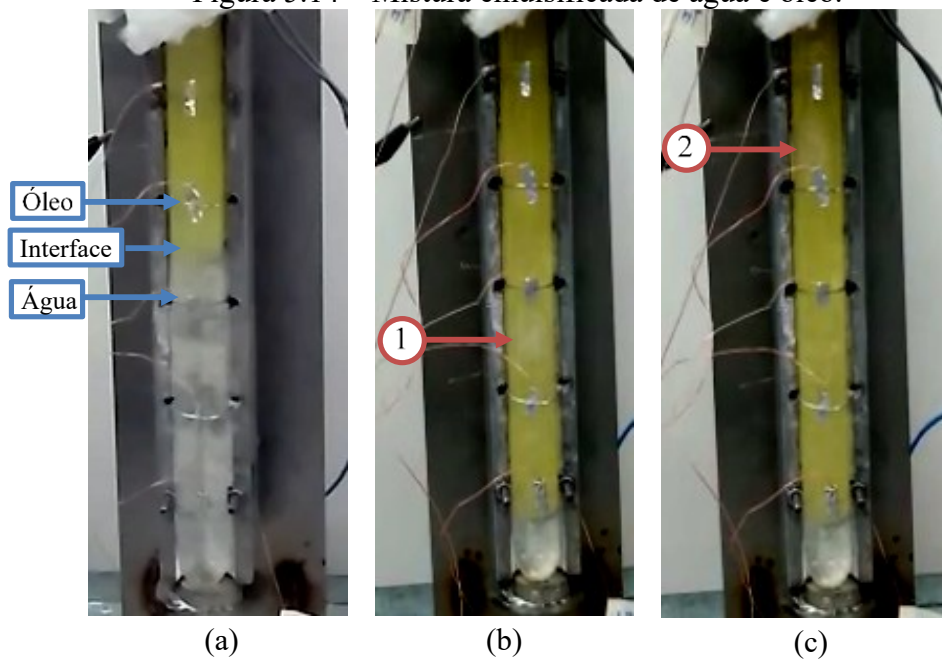


Além disso, vale a pena destacar que o aumento da taxa de transferência de calor no termossifão que opera com água e óleo faz com que o efeito da ebulição nucleada no fluido primário (água) se torne tão intenso que provoca uma mistura com o fluido secundário, fazendo com que esses fluidos se comportem como uma mistura emulsificante. Essa mistura se comporta como um único fluido, possuindo características diferentes das apresentadas anteriormente. A Figura 5.14 apresenta essa condição para o termossifão bifásico que opera com 60% de água e 40% de óleo a uma taxa de transferência de calor de 100 W. Inicialmente, antes do termossifão entrar em operação, os fluidos se comportam como uma mistura heterogênea (Fig. 5.14a) e o acréscimo de calor no dispositivo torna essa mistura emulsificada (Fig. 5.14b). Quando o fluido primário apresenta uma proporção abaixo ou próxima a do fluido secundário esse efeito pode ser mais acentuado, e isso poderia explicar o ponto 1 da Fig. 4.14

do capítulo 4 e seção 4.3.1, onde se observou que o aumento da taxa de transferência de calor proporcionou uma redução abrupta da amplitude de GB, fazendo com que o fluido de trabalho apresentasse um comportamento diferente do que era esperado.

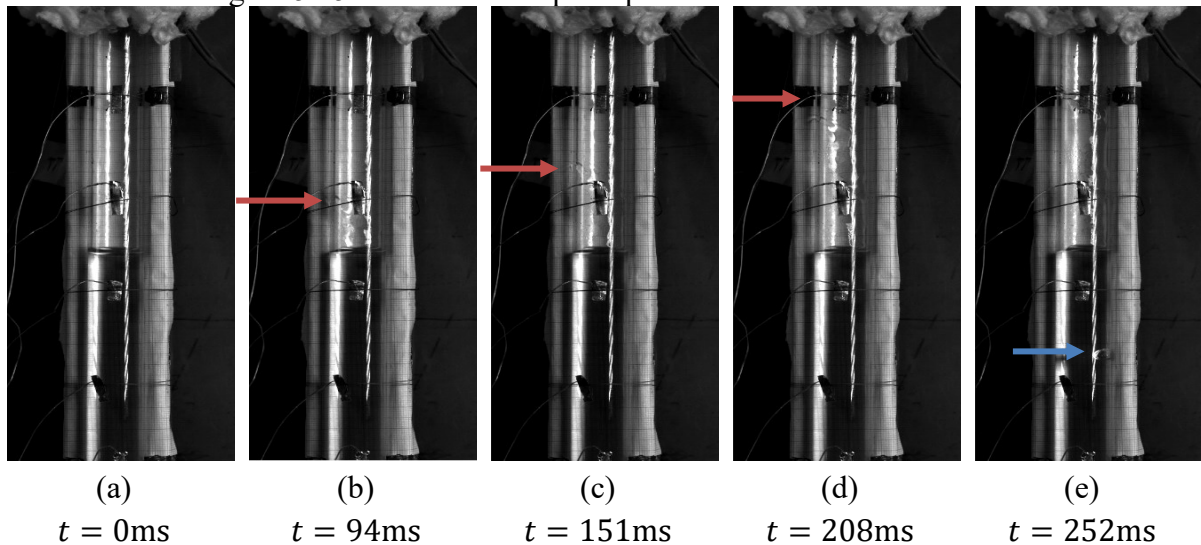
Outra característica que pode ser observada desse comportamento é que as bolhas formadas possuem uma facilidade de atravessar a camada de óleo, como pode ser observado nos pontos 1 e 2 das Figs. 5.14b e 5.14c, respectivamente.

Figura 5.14 – Mistura emulsificada de água e óleo.



Além disso, no regime de GB para a proporção de 60% de água e sem óleo, foi observado que, no momento anterior a formação da bolha de GB, em um breve momento, uma frente de vapor arrasta uma parte do líquido que possa estar voltando do condensador para o evaporador devido a um evento de GB anterior. Esse efeito ocorre em um breve instante de tempo e pode ser observado no conjunto de fotografias da Figura 5.15. Nesta figura, a piscina líquida do termossifão encontra-se inicialmente em repouso (Fig. 5.15a), e no instante anterior a formação da bolha de GB, uma frente de vapor, indicado pelas setas das Figs. 5.15b a 5.15d, influencia o retorno do líquido ao evaporador e, em seguida, ocorre o surgimento do sítio de nucleação (Fig. 5.15e).

Figura 5.15 – Arrasto do líquido proveniente do condensador.



5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo de visualização do fenômeno *Geysier Boiling*, foi observada a relação entre o parâmetro adimensional N , proposto por Pabón *et al.* (2019), e a distância entre a interface do fluido de trabalho e o local de formação da bolha geradora de GB. Foi constatado que, quanto maior é essa distância, também maior é o número N .

Essa mesma característica foi observada tanto para o regime transiente quanto o regime permanente do termossifão, sendo que a diferença entre os dois regimes consiste na magnitude da amplitude de N e as variações que ocorrem nesse parâmetro para o regime transiente.

Além disso, para o conjunto de dados analisados, para um termossifão que opera com água em regime de GB, o valor da amplitude de N pode ser aumentado através do aumento da distância do local de formação do sítio de nucleação. Porém, o valor N apresenta um valor de limite máximo.

Contudo, para o conjunto de dados analisados, quando um termossifão opera com água e óleo em regime de GB, o valor da amplitude de N cresce à medida que se aumenta a distância entre a interface água-óleo e o local de formação da bolha.

Ainda foi observado que, quando o termossifão opera com água e óleo, a bolha formadora de GB tende a estourar antes ou na interface água-óleo, e o aumento da taxa de transferência de calor no dispositivo proporciona a criação de uma mistura emulsificada, e nesse momento, as bolhas formadas podem atravessar a coluna de óleo.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um estudo experimental do fenômeno *Geysers Boiling* em termossifões bifásicos operando com dois fluidos de trabalho simultaneamente, sendo eles: a água destilada e o óleo térmico comercial.

O *Geysers Boiling* é um fenômeno que ocorre de maneira cíclica durante o regime de operação do termossifão. Ele é caracterizado por estágios de formação de bolhas bem definidos, em que o fluido de trabalho se encontra em repouso e o acréscimo de calor propicia o crescimento de bolhas que expandem até atingir um tamanho máximo e que, em seguida, explode, pulverizando vapor saturado e líquido sobre as paredes do condensador do termossifão.

O fenômeno é influenciado por diversas condições em que o dispositivo é submetido como: variação de temperatura, taxa de transferência de calor, coeficiente de transferência de calor externo ao condensador, fluido de trabalho, razão de enchimento, etc. Esses parâmetros são responsáveis pela intensificação ou redução da variação de temperatura (amplitude de temperatura), variação de pressão e ciclo de ocorrência do fenômeno (frequência de GB) que ocorre no termossifão. Assim, a partir dessas condições em que o dispositivo é submetido, foram conduzidos dois estudos experimentais independentes.

O primeiro estudo experimental, realizado em um termossifão bifásico de aço, teve o objetivo de estudar o desempenho térmico no dispositivo operando com *Geysers Boiling*, bem como a influência na amplitude e na frequência do fenômeno de *Geysers Boiling* a partir da modificação das seguintes condições: razão de enchimento entre os dois fluidos de trabalho, taxa de transferência calor fornecida no evaporador e condições de resfriamento no condensador.

Para os termossifões estudados foram observados dois regimes de desempenho no dispositivo durante o regime de GB: alto desempenho (caracterizado pela baixa resistência térmica) e baixo desempenho (com alta resistência térmica). Esses regimes estão relacionados às amplitudes de variações de temperatura que ocorrem durante o GB. Foi observado que os dispositivos que apresentaram as maiores amplitudes foram os que possuíram maiores resistências térmicas. Também, foi observado que o desempenho do termossifão foi afetado com a diminuição da temperatura de resfriamento do condensador, tendo uma diminuição da sua capacidade de transferência de calor. Por outro lado, o desempenho do dispositivo sobe com o aumento da taxa de transferência de calor.

Foi observado também para um termossifão de aço que opera com um e dois fluidos a diferentes razões de enchimento, a influência do fator de enchimento na formação do GB, sendo observadas duas situações. A primeira está relacionada ao uso de um único fluido de trabalho no dispositivo (para esse caso, foi utilizado água destilada). Para essa situação, a altura da coluna de líquido está diretamente associada a intensidade do fenômeno, isto é, quanto maior a pressão hidrostática imposta pela piscina de líquido, maior é a amplitude do GB. A segunda situação é relacionada ao dispositivo operando com dois fluidos de trabalho insolúveis (nesse estudo, os fluidos de trabalho foram água destilada e óleo térmico). Nesse caso, pequenas camadas de óleo comportam-se como uma membrana, e a amplitude do fenômeno é intensificada. Por outro lado, o aumento da camada de óleo reduz o “efeito membrana”, de modo, que a pressão hidrostática se torna mais significativa.

Além disso, foi observado que o fenômeno de GB está associado ao número de Reynolds. Para Reynolds maiores que 4, o dispositivo opera na condição ideal, para Reynolds menores do que 2 o dispositivo opera no regime de GB, e para Reynolds entre 2 e 4, o dispositivo pode apresentar GB ou não, sendo esse caracterizado como regime de transição.

O mesmo foi observado para o número de Jakob corrigido, onde valores menores que 5000 correspondem ao regime ideal de operação, e valores maiores que este, ao regime de *Geysers Boiling*.

Foi observado também que o número de confinamento está relacionado ao número de Jakob corrigido, e que o aumento de um desses parâmetros implica no aumento do outro. Deste modo, para o regime ideal de operação do termossifão (região onde o número de Jakob corrigido é menor) o diâmetro de partida de bolha tende a apresentar valores menores do que o regime de GB.

Finalmente, foi apresentado um modelo para prever a amplitude de GB, que apresentou um erro com relação aos dados experimentais menor que 25%. Já o modelo teórico para a frequência de GB apresentou um erro menor do que 40% com relação aos dados experimentais.

O segundo estudo experimental, realizado em um termossifão bifásico de vidro, teve como objetivo principal analisar de forma visual e qualitativa a formação da amplitude da bolha de GB. Para isso, foram impostas diferentes taxas de transferência de calor no evaporador, com diferentes razões de enchimento dos dois fluidos, e com o condensador em convecção natural com o ambiente.

Nesse experimento, foi observado que a intensidade em que ocorre o GB está associada com a distância entre a interface do fluido de trabalho e o local de formação da bolha

geradora de GB. Foi constatado que, quanto maior é essa distância, também maior é o número N .

Além disso, para o conjunto de dados analisados, para um termossifão que opera com água em regime de GB, o valor da amplitude de N pode ser aumentado através do aumento da distância do local de formação do sítio de nucleação. Porém, o valor N apresenta um valor de limite máximo.

Contudo, para o conjunto de dados analisados, quando um termossifão opera com água e óleo em regime de GB, o valor da amplitude de N cresce à medida que se aumenta a distância entre a interface água-óleo e o local de formação da bolha.

Ainda foi observado que, quando o termossifão opera com água e óleo, a bolha formadora de GB tende a estourar antes ou na interface água-óleo, e o aumento da taxa de transferência de calor no dispositivo proporciona a criação de uma mistura emulsificada, e nesse momento, as bolhas formadas podem atravessar a coluna de óleo.

Por fim, observou-se que o fenômeno GB pode criar depressões no evaporador as quais podem ser usadas como uma forma de substituição de válvulas *on-off* em termossifões antigravidade. Além disso, o fenômeno pode resolver o problema de retorno do líquido apresentado pelos termossifões antigravidade que precisam de válvulas *on-off* para despressurizar o evaporador de maneira que se possa devolver o líquido do reservatório ao evaporador.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de trabalhos futuros, se recomenda a realização de mais experimentos de modo a se ter melhores ajustes dos coeficientes para os modelos propostos.

Propõe-se efetuar ensaios com termossifões que operem com água e óleo de modo a estabelecer razões de enchimento, no qual, possa se definir em que proporções o “efeito membrana” predomina sobre o efeito hidrostático.

Propõe-se a realização de estudos mais detalhados com água e óleo, de modo a investigar se existe um limite máximo para o número associado a distância entre a interface do fluido de trabalho e o local de formação da bolha geradora de GB. Também, poderia ser investigado os valores máximos para a amplitude de quando o termossifão opera com água.

Propõe-se a aplicação de termossifões bifásicos operando com dois fluidos de trabalho de modo que a utilização das oscilações de temperatura e pressão possam simular a aplicação válvulas *on-off* que estão presentes em termossifões antigravidade.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. L.; COLLE, S.; SKIAVINE, J. Working characteristics of a compact solar hot water system with heat pipes during start-up and geyser boiling periods. In: **Proceedings of the ISES Solar World Congress, Göteborg, Sweden**, June. [S.l.: s.n.], 2003. p. 14–19
- ALAMMAR , A. A.; AL-DADAH, R. K.; MAHMOUD, S. M. Experimental investigation of the influence of the geyser boiling phenomenon on the thermal performance of a two-phase closed thermosyphon. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2531-2543, 2018.
- BRANDIM, A.S.; SOUSA, R.R.M.; ALVES JR, C. **Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga térmica**. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 14, n. 1, p. 749-758, 2009.
- BOURE, J. A.; BERGLES, A. E.; TONG, L. S. Review of two-phase flow instability. **Nuclear Engineering and Design**, v. 25, p. 165-192, 1973.
- CAREY, V. P. **Liquid-vapor phase-change phenomena : an introduction to the thermophysics of vaporization and condensation processes in heat transfer equipment**. [s.l.] Taylor & Francis, 1992.
- CHEN, J.; YANG, S.; LIAO, S.; CAO, X. Experimental investigation of effective parameters on geyser periodicity in a vertical heated system. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 68, p. 163-176, 2015.
- CISTERNA, L. H. R. **TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO, MODELAGEM E TESTES DE TERMOSSIFÕES BIFÁSICOS DE SÓDIO – EFEITOS DE GEYSER BOILING E DE PONTA FRIA**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2019.
- CISTERNA, L. H. R.; MILANEZ, F. H.; MANTELLI, M. B. H. Prediction of geyser boiling limit for high temperature two-phase thermosyphons. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 165, p. 120656, 2020a.
- CISTERNA, L. H. R.; CARDOSO, M. C. K.; FRONZA, E. L.; MILANEZ, F. H.; MANTELLI, M. B. H. Operation regimes and heat transfer coefficients in sodium two-phase thermosyphons. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 152, p. 119555, 2020b.
- COLE, R. Photographic study of boiling in the region of critical heat flux. **AIChE J.** vol. 6, p. 533-542, 1960.
- DE BENI, G.; FRIESEN, R.; THOMA, H.; VENERONI, R. Device for Passive Downward Heat Transport: Design Criteria and Operational Results. **Advances in Heat Pipe Technology**, Londres, p. 673-683, 1982.

DE BENI, G.; FRIESEN, R. Passive Downward Heat Transport: Experimental Results of a Technical Unit. **Solar Energy**, v. 34, n. 2, p. 127-134, 1985.

DOBRIANSKI, Y. A New Concept of Antigravity Thermosyphon. **16th International Heat Pipe Conference**, Lyon, 2012.

DOBRIANSKY, Y.; YOHANIS, Y. G. Cyclical reverse thermosiphon. **Archives of Thermodynamics**, v. 31, n.1, p. 3-32, 2010.

DOBRIANSKY, Y.; WOJCIK, . State of the art review of conventional and anti-gravity thermosyphons: Focus on two working fluids. **International Journal of Thermal Sciences**, p. 491-508, 2019.

DUDA, M.; DOBRIANSKI, J.; CHLUDZINSKI, D. Analysis of the possibility of applications for a two-phase reverse thermosyphon in passive heat transport systems. **Utilization of Renewable Energy Sources**, v. 49, p. 7, 2018.

EMAMI, M. S.; NOIE, S.; KHOSHNOODI, M.; HAMED MOSAVIAN, M.T.; KIANIFAR, A. Investigation of geyser boiling phenomenon in a two-phase closed thermosyphon. **Heat Transfer Engineering**, Taylor & Francis, v. 30, n. 5, p. 408–415, 2009

FAGHRI, A. **Heat Pipe Science and Technology**. 1^a. ed. Washington: Taylor & Francis, 1995.

FERREIRA, G. E. F. **Avaliação da resistência à fadiga térmica do aço AISI H13 nitretado pelos processos gasoso e por plasma**. 2001.

FILIPPESCHI, S. On Periodic Two-Phase Thermosyphons Operating Against Gravity. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 45, n. 2, p. 124–137, 2006.

GUO, H.; GUO, Q.; YAN, X. K.; YE, F.; MA, C. F. Experimental investigation on heat transfer performance of high-temperature thermosyphon charged with sodium-potassium alloy. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 139, p. 402–408, 2018.

GORENFLO, D.; KNABE, V.; BIELING, V. Bubble Density on Surfaces with Nucleate Boiling-Its Influence on Heat Transfer and Burnout Heat Flux at Elevated Saturation Pressures. In: **International Heat Transfer Conference Digital Library**. Begel House Inc., 1986.

IVEY, H. J. Relationships between bubble frequency, departure diameter and rise velocity in nucleate boiling. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 10, n. 8, p. 1023–1040, 1 ago. 1967.

JAFARI, D.; FRANCO, A.; FILIPPESCHI, S.; DI MARCO, P. Two-phase closed thermosyphons: A review of studies and solar applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 575-593, 2016.

JAFARI, D.; FILIPPESCHI, S.; FRANCO, A.; DI MARCO, P. Unsteady experimental and numerical analysis of a two-phase closed thermosyphon at different filling ratios. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 81, p. 164-174, 2017.

JENSEN, M. K.; MEMMEL, G. J. Evaluation of Bubble Departure Diameter Correlations. **Proc. Eighth Int. Heat Transfer Conf.** vol. 4, p. 1907-1912, 1986.

JOUHARA, H.; FADHL, B.; WROBEL, L. C. Three-dimensional CFD simulation of geyser boiling in a two-phase closed thermosyphon. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, p. 16463-16476, 2016.

KAMINAGA, F., HASHIMOTO, H., FERROZ, M.D., GOTO, K., AND MATSUMURA, K. Heat Transfer Characteristics of Evaporation and Condensation in a Two-Phase Closed Thermosyphon, 8th IHPC, China (1992a).

KAMINAGA, F., OKAMOTO, Y., AND SUZUKI, T. Study in Boiling Heat Transfer Correlation in a Closed Two-Phase Thermosyphon, **8th IHPC**, China (1992b).

KAKAÇ , S.; BONB, B. A Review of two-phase flow dynamic instabilities in tube boiling systems. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, p. 399-433, 2008.

KEMPERS, R.; ELKHOLY, A. Experimental investigation of geyser boiling in a small diameter two-phase loop thermosyphon. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 118, 2020.

KHAZAEI, I.; HOSSEINI, R.; NOIE, S. H. Experimental investigation of effective parameters and correlation of geyser boiling in a two-phase closed thermosyphon. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, p. 406-412, 2010.

KIYOMURA, I. S.; MOGAJI, T. S.; MANETTI, L.L.; CARDOSO, E.M. A predictive model for confined and unconfined nucleate boiling heat transfer coefficient. **Applied Thermal Engineering**, v. 127, p.1274–1284, Dec. 2017.

LEE, H. **Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells.** New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

LIU, Y.; LI, Z.; LI, Y.; KIM, S.; JIANG, Y. Experimental investigation of geyser boiling in a two-phase closed loop thermosyphon with high filling ratios. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 127, p. 857–869, 2018.

MANTELLI, M. B. H. **Thermosyphons and Heat Pipes: Theory and Applications.** Springer International Publishing, 2021.

MANTELLI, M. B. H. Tubos de calor e termossifões. Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, 2012. Notas de aula.

MANTELLI, M. B. H. Thermosyphon Technology for Industrial Applications. In: VASILIEV, L. L.; KAKAÇ, **Heat Pipes and Solid Sorption Transformations - Fundamentals and Practical Applications**. New York: CRC Press, 2013. p. 411–464.

MANTELLI, M. B. H.; COLLE, S.; DE CARVALHO, R. D. **Study of closed two-phase thermosyphons for bakery oven application**. 33rd National Heat Transfer Conference ASME. Albuquerque, New Mexico: [s.n.]. 1999.

MAO, H.; LI, Y.; WANG, L.; WANG, J.; XIE, F. Investigation of appearance and intensity of geyser phenomenon in a vertical cryogenic pipe. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 150, 2020.

MIKIC, B. B.; ROHSENOW, W. M. Bubble growth rates in non-uniform temperature field. **Prog. Heat Mass transfer**, vol. II, p. 283-292, 1962.

NIRO, A.; BERETTA, G. P. Boiling regimes in a closed two-phase thermosyphon, v. 33, p. 2099-2110, 1990.

NUNTAPHAN, A.; TIAN SUWAN, J.; KIATSIRIROAT, T.; WANG, C. C. Performance improvement of thermosyphon heat exchangers by using two kinds of working fluids. **Heat transfer engineering**, v. 22, p. 28-40, 2001.

OCHTERBECK, J. M. Heat Pipes. In: BEJAN, A.; KRAUS, A. D. **Heat Transfer Handbook**. New Jersey: Jonh Wiley & Sons, 2003. p. 1193-1194.

PABÓN, N. Y. L.; MERA, J. P. F.; VIEIRA, G. S. C.; MANTELLI, M. B. H. Visualization and experimental analysis of Geyser boiling phenomena in two-phase thermosyphons. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 141, p. 876-890, 2019.

PABÓN, N. Y. L. **Análise teórico-experimental do fenômeno de Geyser Boiling em termossifões bifásicos fechados**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 236. 2019.

PESSOA, F. **O Guardador de Rebanhos**. In Poemas de Alberto Caeiro. Lisboa: Ática, 1946 (10ª ed. 1993). Disponível em: <<http://arquivopessoa.net/textos/1172>>. Acesso em: 02 fev. 2021.

TONG, L. L.; SHAO, G.; YUAN, K.; CAO, X. W. An experimental study on geysering phenomena induced by buoyancy in a heating system. **Annals of Nuclear Energy**, v. 63, p. 129-137, 2014.

TONG, L.; Chen, J.; Cao, X.; Yang, S.; Liao, S.; Deng, J.; Zeng, W. Visualization experiments on the geyser boiling-induced instability in vertical circular tube at low-pressures. **Annals of Nuclear Energy**, Elsevier, v. 77, p. 487–497, 2015.

Xia, G.; Wang, W.; Cheng, L.; Ma, D.. Visualization study on the instabilities of phase-change heat transfer in a flat two-phase closed thermosyphon. **Applied Thermal Engineering**, v. 116, p. 392-405, 2017.

ZUBER, N. Nucleate boiling – the region of isolated bubbles – similarity with natural convection. **Int. J. Heat Mass Transfer**, vol. 10, p. 53-65, 1963.

APÊNDICE A – PROPRIEDADES DOS FLUIDOS DE TRABALHO

As propriedades dos fluidos de trabalho (água destilada e óleo térmico) utilizados ao longo da dissertação são apresentadas na Tab. A.1.

Tabela A.1 – Propriedades dos fluidos de trabalho utilizado.

	Água Destilada	Óleo térmico (LUBRAX UTILE OT32)
Condutividade térmica do líquido	0,598 W/mK (Para 20°C) 0,682 W/mK (Para 150°C)	0,132 W/mK (Para 20°C) 0,122 W/mK (Para 150°C)
Coefficiente de expansão térmica	$0,195 \cdot 10^{-3}$ (Para 20°C) $1,025 \cdot 10^{-3}$ (Para 150°C)	$0,7 \cdot 10^{-3}$ (Valor médio)
Viscosidade cinemática do líquido	$6,58 \cdot 10^{-7}$ m ² /s (Para 40°C) $2,94 \cdot 10^{-7}$ m ² /s (Para 100°C)	$3,25 \cdot 10^{-5}$ m ² /s (Para 40°C) $5,50 \cdot 10^{-6}$ m ² /s (Para 100°C)
Calor específico do líquido	4182 kJ/kgK (Para 20°C) 4311 kJ/kgK (Para 150°C)	1,925 kJ/kgK (Para 20°C) 2,469 kJ/kgK (Para 150°C)
Densidade do líquido	1000 kg/m ³ (Para 4°C) 998,2 kg/m ³ (Para 20°C)	-
Densidade relativa (20°C do óleo em relação a 4°C da água)	-	0,873
Solubilidade	-	Não solúvel em água.
Índice de viscosidade	-	105

Fonte: Os dados da água foram obtidos de Cengel e Cimbala (2007) e do óleo térmico FISPQ (2015).

REFERÊNCIA DO APÊNDICE A

CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos – Fundamentos e Aplicações**. 1ª Edição. Editora McGraw Hill - Artmed, 2007.

FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS - FISPQ. **Lubrax Utile OT (32, 46, 68, 100)**. 2015. Disponível em: <<https://br.com.br/wcm/connect/36d8a13a-28fe-47af-a428-8a9e21e402e5/fispq-lub-ind->

[diversas-lubraxes-utiles-otras-revisiones.pdf?MOD=AJPERES&CVID=13iwDBX>](#). Acesso em: 13 ago. 2020.

APÊNDICE B – ANÁLISE DE INCERTEZA

Nesse capítulo é apresentado o procedimento e o cálculo das incertezas das variáveis obtidas no ensaio. A metodologia utilizada tem como base as recomendações apresentadas no guia do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO, 2008).


B.1 INCERTEZA DE MEDIÇÃO



Medidas experimentais estão sujeitas a erros, na qual, implica haver uma diferença entre o valor medido e o valor real de uma grandeza física. Uma maneira de minimizar esses erros é estabelecer um intervalo de valores ao mensurando de forma que se possa aumentar o grau de confiança a respeito da medida realizada. Esse intervalo de valores é denominado incerteza. A incerteza pode ser classificada como: incertezas padrão tipo A e incertezas padrão tipo B. As incertezas padrão do tipo A são avaliadas via análise estatística a partir de um grupo de observações repetidas, enquanto que as incertezas padrão do tipo B não são avaliadas por meio de observações replicadas (ARAUJO, 2017).

As incertezas do tipo B são baseadas em dados de uma única leitura analógica ou digital, experiência ou conhecimento prévio do comportamento ou propriedades relevantes do material e instrumentos, especificações do fabricante e calibração dos equipamentos. Neste trabalho, para as variáveis medidas, foi considerada a incerteza padrão tipo B sendo determinadas de acordo com o INMETRO (2008).

A incerteza-padrão do tipo B é obtida por meio de uma função densidade de probabilidade que permite fazer uma inferência dos dados coletados a partir da teoria da probabilidade. O quadro B.1 apresenta três funções de densidade de probabilidade que podem ser utilizadas dependendo do tipo de incerteza trabalhada.

Quadro B.1 – Funções densidade de probabilidade.

Tipo de Avaliação	Tipo de função densidade de probabilidade		Uso
A	Gaussiana		Conjunto de medidas repetidas e dispersas

B	Retangular		Única medida digital
B	Triangular		Única medida analógica

Fonte: Adaptado de Araujo (2017).

Por meio da função densidade de probabilidade, é possível obter a incerteza-padrão (u), que representa uma medida quantitativa de uma faixa de valores correspondentes a melhor estimativa ao mensurando. O quadro B.2 apresenta o valor da incerteza-padrão e a função densidade probabilidade correspondente.

Quadro B.2 – Incerteza das funções densidade de probabilidade.

Função densidade de probabilidade	Incerteza-padrão	Uso
Retangular	$u = \frac{a}{2\sqrt{3}}$	Quando se conhece apenas os valores máximos e mínimos de variação (a).
Triangular	$u = \frac{a}{2\sqrt{6}}$	Quando se conhece os valores máximo e mínimo de variação (a) e o valor mais provável.
Gaussiana	$u = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	Desvio-padrão (σ) da média de um conjunto de n medições repetidas.

Fonte: Adaptado de Araujo (2017).

Para uma incerteza do tipo B, que apresenta mais de uma fonte de incerteza identificável na medição, a contribuição de todas as fontes deve ser considerada para que a incerteza seja significativa (ARAUJO, 2017). A incerteza, nesse caso, é denominada incerteza-padrão combinada e é expressa por:

$$u_c = \sqrt{\sum u_i^2} \quad (\text{B.1})$$

No caso, em que a variável não é identificável diretamente na medição, mas é obtida por meio de outros parâmetros, a incerteza-padrão passa a ser definida por:

$$u_c(f) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (\text{B.2})$$

onde f representa a função de formação, n a quantidade de variáveis presentes na função e x_i cada variável da função.

Para aumentar a confiança sobre um resultado medido, de forma a significar a melhor estimativa do valor atribuível ao mensurando, utiliza-se a incerteza padrão expandida. Ela é obtida através da multiplicação da incerteza-padrão combinada (u_c) por um fator de abrangência (k_p)(correspondente ao coeficiente *t-Student*). Neste trabalho foi utilizado um fator de abrangência igual a dois, significando um intervalo de confiança de 95,45%.

As informações sobre a incerteza calculada para cada variável testada são apresentadas nas seções a seguir.

B.1.1 Incerteza associada ao termopar

A medição de temperatura é realizada por um termopar do tipo K (cromel e alumel) de 0,13 mm de diâmetro, que se conecta a um multiplexador AM25T que está ligado ao sistema de aquisição de dados da *Campbell Scientific* (módulo CR1000). As leituras de temperatura são processadas pelo *software* Logger Net 4.1.

As incertezas associadas a medição de temperatura, nesse caso, são originadas tanto do termopar quanto de cada dispositivo ligado ao sistema de aquisição de dados. Como cada medição realizada, é uma única medida digital, será utilizada uma função de densidade de probabilidade do tipo retangular.

Assim, as incertezas de cada dispositivo podem ser agrupadas de modo a ser expressa em uma variável única, a incerteza padrão combinada. Que pode ser calculada a partir da Eq. B.1, onde u_i corresponde à incerteza padrão associada em cada dispositivo (no caso, termopar, multiplexador AM25T e módulo CR1000).

A Tabela B.1 apresenta um resumo das incertezas envolvidas na medição da temperatura.

Tabela B.1 – Análise de incerteza do termopar.

Símbolo	Fonte de Incerteza	Valor	Distribuição	Incerteza
u_i	Termopar tipo K ¹	$\pm 1,10$ °C	Retangular	$\pm 0,32$
	Multiplexador AM25T ²	$\pm 0,40$ °C	Retangular	$\pm 0,12$
	Módulo CR1000 ³	$\pm 0,80$ °C	Retangular	$\pm 0,23$
u_c	Incerteza padrão combinada	-	-	$\pm 0,41$
U	Incerteza expandida	-		$\pm 0,82$

Fontes: ¹ Omega (2015a), ² Campbell Scientific (2017) e ³ Campbell Scientific (2018).

B.1.2 Incerteza associada a fonte de alimentação

A análise de incerteza proveniente da fonte de alimentação MCE (modelo 1310) é realizada, a partir, das variáveis identificáveis pela fonte de alimentação: tensão de alimentação (V) e corrente (I). O produto dessas variáveis corresponde a equação da potência elétrica dissipada (\dot{Q}) pela resistência elétrica (Eq. B.3), dada por:

$$\dot{Q} = VI \quad (\text{B.3})$$

A análise de incerteza, nesse caso, é feita com base na Eq. B.3, que corresponde a raiz quadrada da soma das quadraturas de todas as incertezas geradas pela potência elétrica dissipada (Eq. B.4):

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{Q}}{\partial V} dV\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}}{\partial I} dI\right)^2} \quad (\text{B.4})$$

onde dV e dI correspondem, respectivamente, a incerteza da tensão de alimentação e a incerteza da corrente. Como $I = \frac{\partial \dot{Q}}{\partial V}$ e $V = \frac{\partial \dot{Q}}{\partial I}$, então:

$$u_c = \sqrt{(IdV)^2 + (VdI)^2} \quad (\text{B.5})$$

As variáveis: tensão de alimentação (V) e corrente (I) da Eq. B.5 são parâmetros fornecidos pela fonte de alimentação, através do seu visor digital. As incertezas associadas a precisão da medição correspondem a $\pm 1\%$ do valor medido (MCE, 2020).

A Tabela B.2 apresenta um resumo das incertezas envolvidas na medição da potência elétrica dissipada.

Tabela B.2 – Análise de incerteza da potência elétrica dissipada.

Potência	Fonte de Incerteza	Valor	Distribuição	$\pm u_i$	Incerteza padrão combinada	Incerteza expandida
20W	Tensão	18 V	-	-	$\pm 0,08$	$\pm 0,16$
	Corrente	1,16 A	-	-		
	Incerteza da tensão	0,18 V	Retangular	0,05		
	Incerteza da corrente	0,01 A	Retangular	0,003		
60W	Tensão	30 V	-	-	$\pm 0,25$	$\pm 0,50$
	Corrente	2 A	-	-		
	Incerteza da tensão	0,3 V	Retangular	0,09		
	Incerteza da corrente	0,02 A	Retangular	0,006		
100W	Tensão	39 V	-	-	$\pm 1,20$	$\pm 2,40$
	Corrente	2,57 A	-	-		
	Incerteza da tensão	0,39	Retangular	0,11		
	Incerteza da corrente	0,03	Retangular	0,01		

B.1.3 Incerteza associada ao sensor de pressão

A medição de pressão é realizada por um sensor de pressão da marca Omega, modelo PX409-050 AV, que se conecta ao sistema de aquisição de dados da *Campbell Scientific* (módulo CR1000). As leituras de pressão são processadas pelo *software* Logger Net 4.1.

As incertezas associadas a medição de pressão são originadas do sensor de pressão e do sistema de aquisição de dados (módulo CR1000). Como a medição realizada, provém de uma medida digital, será adotada a função de densidade de probabilidade do tipo retangular.

As incertezas de cada dispositivo podem ser agrupadas de modo a ser expressa em uma variável única, a incerteza padrão combinada (Eq. B.1). Os valores das incertezas obtidas foram

listados na Tabela B.3, onde apresenta um resumo das incertezas envolvidas na medição da pressão.

Tabela B.3 – Análise de incerteza do sensor de pressão.

Símbolo	Fonte de Incerteza	Valor	Distribuição	Incerteza
u_i	Sensor de Pressão ¹	$\pm 0,50$ mV	Retangular	$\pm 0,14$
	Módulo CR1000 ²	$\pm 1,00$ mV	Retangular	$\pm 0,29$
u_c	Incerteza padrão combinada	-	-	$\pm 0,32$
U	Incerteza expandida	-	-	$\pm 0,64$

Fontes: ¹ Omega (2015b) e ² Campbell Scientific (2018).

A partir da incerteza expandida é possível obter a incerteza associada no uso da equação do sensor de pressão (Eq. B.6, que relaciona a tensão de saída, em milivolt, a pressão medida pelo sensor) aplicando a incerteza expandida da Eq. B.2, tem-se a Eq. B.7:

$$P_s(x_{Vdc}) = 0,033 \cdot x_{Vdc} + 0,032 \quad (\text{B.6})$$

$$U_p = 0,033 \cdot U \quad (\text{B.7})$$

Assim, a melhor aproximação da incerteza associada ao sensor de pressão é a incerteza padrão expandida de 0,64, na qual, foi usado uma função de densidade de probabilidade retangular, e deste modo a incerteza associada a medição do sensor de pressão corresponde a $\pm 0,02$ bar.

REFERÊNCIA DO APÊNDICE B

ARAÚJO, L. E. E. **Introdução à Avaliação e Expressão de Incerteza em Medições**. 2017. Disponível em: <<https://sites.ifi.unicamp.br/rouxinol/files/2019/01/Introdu%C3%A7%C3%A3o-%C3%A0-Incerteza-de-Medi%C3%A7%C3%B5es.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

INMETRO. **Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008**. 2008. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/gum_final.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2020.

MICROTÉCNICA SISTEMAS DE ENERGIA - MCE. **Catálogo de Variáveis Digitais - Saída simples / dupla. 2020.** Disponível em: <<https://www.mctecnica.com.br/gerenciar-portal/area-adm/produto/0.220342001592309856.htm>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **Instruction Manual - AM25T Solid-State Thermocouple Multiplexer.** 2017. Disponível em: <https://s.campbellsci.com/documents/ca/manuals/am25t_man.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2020.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **Operator's Manual - CR1000 Datalogger.** 2018. Disponível em: <<https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cr1000.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

OMEGA. **Códigos de Cores e Limites de Erro.** 2015a. Disponível em: <<https://br.omega.com/techref/colorcodes.html>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

OMEGA. **Transdutores de Pressão de Alta Exatidão- Série PX409.** 2015b. Disponível em: <https://br.omega.com/pressure/pdf/PX409_SERIES.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2020.

INMETRO. Avaliação de dados de medição: **Guia para a expressão de incerteza de medição - GUM 2008.** Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012. 141 p.