

ESTUDO EXPERIMENTAL DE CIRCULAÇÃO NATURAL BIFÁSICA USANDO
TÉCNICAS ULTRASSÔNICAS E DE VISUALIZAÇÃO

Wanderley Freitas Lemos

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientador: Su Jian

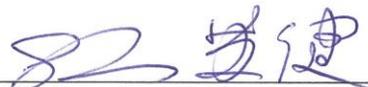
Rio de Janeiro
Setembro de 2014

ESTUDO EXPERIMENTAL DE CIRCULAÇÃO NATURAL BIFÁSICA USANDO
TÉCNICAS ULTRASSÔNICAS E DE VISUALIZAÇÃO

Wanderley Freitas Lemos

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

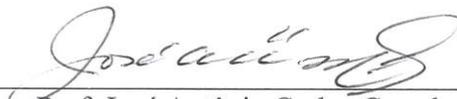
Examinada por:



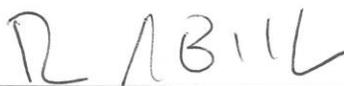
Prof. Su Jian, D.Sc.



Prof. Eduardo Gomes Dutra do Carmo, D.Sc.



Prof. José Antônio Carlos Canedo Medeiros, D.Sc.



Prof. Paulo Augusto Berquó de Sampaio, Ph.D.



Prof. Enio Pedone Bandarra Filho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2014

Lemos, Wanderley Freitas

Estudo Experimental de Circulação Natural Bifásica Usando Técnicas Ultrassônicas e de Visualização – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XXVI, 277 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Su Jian

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Nuclear, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 246-256.

1. Circulação Natural. 2. Escoamento Bifásico. 3. Técnica Ultrassônica. 4. Técnica de Visualização. I. Jian, Su. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

Este trabalho é dedicado à Elisabete, minha esposa,
Eric e Enzo, meus filhos, Heitor, meu neto,
Cecílio e Marília, meus pais,
toda família.

Agradecimentos

A Deus.

Sem dúvida, foi uma longa caminhada. Entretanto, certo de que não teria chegado aqui sozinho, agradeço ao meu orientador, professor Su Jian, pela paciência e por todo apoio prestado ao longo do doutorado.

Aos meus irmãos, Vanda, Gilberto, Orlando e Sidney, pelas demonstrações de incentivos ao longo de minha vida.

Ao Dr. José Luiz Horácio Faccini, do IEN/CNEN, pelas orientações e apoio técnico.

Aos funcionários do IEN/IRD/CNEN, em especial a todos do Laboratório de Termo-Hidráulica Experimental, Edson, Jorge Coutinho, Sérgio Freitas, por terem ajudado na preparação das instalações necessárias à realização dos experimentos. Ao Engo. Santana e equipe, pelo apoio técnico e manutenção dos sistemas de aquisição de dados. Ao Engo. Marcel e equipe, pelo apoio nas soluções técnicas de informática.

Aos bolsistas, Amanda, Antônio, Douglas, Francisco, Iranildo e Pedro pelo apoio nas aquisições e processamento de dados experimentais.

Aos colegas do Curso de Automação Industrial e Eletromecânica, da Unidade de Ensino Descentralizada de Nova Iguaçu do CEFET-RJ, pelo apoio para viabilizar a conclusão do curso.

Ao CEFET-RJ pela oportunidade da qualificação profissional.

Aos funcionários do PEN e colegas do LASME, os quais também foram fundamentais pelo apoio durante a realização do curso.

À CNPq, CAPES, FAPERJ e COPPE-UFRJ pelo suporte técnico e financeiro.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ESTUDO EXPERIMENTAL DE CIRCULAÇÃO NATURAL BIFÁSICA USANDO TÉCNICAS ULTRASSÔNICAS E DE VISUALIZAÇÃO

Wanderley Freitas Lemos

Setembro/2014

Orientador: Su Jian

Programa: Engenharia Nuclear

A circulação natural em regime de escoamento bifásica é um fenômeno termo-hidráulico de grande importância para a remoção passiva de calor residual em reatores nucleares avançados. O objetivo do presente trabalho é caracterizar experimentalmente os parâmetros interfaciais de circulação natural bifásica, principalmente o comprimento, a velocidade e o perfil de bolhas, em função da potência de aquecimento e vazão de resfriamento secundário do circuito de circulação natural. Os experimentos, de dezesseis casos em combinações de quatro níveis de potência do aquecedor e quatro níveis de resfriamento do trocador de calor, foram realizados no Circuito de Circulação Natural (CCN) do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN) usando-se a técnica de visualização com câmera de alta velocidade e técnicas ultrassônicas. Estatísticas de quantidades de bolhas, histogramas de comprimentos e distribuições de velocidades de bolhas, correlações entre comprimentos e velocidades de bolhas, evolução temporal de temperaturas ao longo do circuito e vazões de fase líquida nas pernas fria e quente do circuito foram apresentados. Perfis de bolhas, espessuras de filme líquido e fração de vazio foram determinados para vinte e oito bolhas típicas. A existência de um regime de escoamento pistonado bem comportado foi identificada por um intervalo estreito de condições de funcionamento. Conclui-se que a circulação natural bifásica é muito diferente do escoamento bifásico gás-líquido em um tubo vertical adiabático.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

EXPERIMENTAL STUDY OF TWO-PHASE NATURAL CIRCULATION USING
VISUALIZATION AND ULTRASONIC TECHNIQUES

Wanderley Freitas Lemos

September/2014

Advisor: Su Jian

Department: Nuclear Engineering

Natural circulation in two-phase flow regime is a thermo-hydraulic phenomenon of great importance to the passive removal of residual heat in advanced nuclear reactors. The objective of this study is to characterize experimentally interfacial parameters of two-phase natural circulation, especially the length, the speed and the profile of bubbles as a function of the heating power and the flow rate of secondary cooling in the natural circulation circuit. The experiments, of sixteen combinations of four heater powers and four cooling flow rates of the heat exchanger were carried out in the Natural Circulation Circuit (CCN) of Nuclear Engineering Institute (IEN/CNEN) by using a visualization technique with high speed camera and ultrasonic techniques. Statistic parameters of bubbles, histogram distributions of bubble lengths and speeds, correlations between bubble lengths and speeds, temperature evolutions along the circuit, and liquid phase flow rates in the hot and cold legs of the circuit were presented. Bubbles profiles, liquid film thickness and void fraction were determined for twenty-eight typical bubbles. The existence of a well behaved slug flow regime has been identified for a narrow range of operating conditions. It was conclude that the two-phase natural circulation is very different from gas-liquid two-phase flow in an adiabatic vertical tube.

Sumário

Dedicatória	iv
Agradecimentos	v
Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	xiii
Lista de Símbolos	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	4
1.2 Organização do Trabalho	5
2 Fundamentos e Revisão Bibliográfica	7
2.1 Sistema Passivo de Remoção de Calor Residual	8
2.1.1 Bases de Projeto de Sistemas Passivos de Remoção de Calor Residual	12
2.1.2 Parâmetros de Similaridade Monofásica	14
2.1.3 Parâmetros adicionais	16
2.1.4 Critérios de Similaridade	17
2.1.5 Parâmetros de Similaridade Bifásica	19
2.2 Fenômeno de Circulação Natural	22
2.3 Modelagem Analítica da Circulação Natural	30

2.3.1	Conservação da Quantidade de Movimento	31
2.3.2	Conservação de Energia	31
2.3.3	Equação de Estado	31
2.3.4	Integração da Equação da Quantidade de Movimento	31
2.3.5	Escoamentos Estacionários	32
2.4	Circulação Natural Bifásica	33
2.4.1	Leis Bifásicas de Similaridades	36
2.5	Escalonamento e Similaridade	37
2.6	Escoamentos Bifásicos	43
2.6.1	Escoamentos Bifásicos Verticais	45
2.6.2	Mapas de Escoamentos Bifásicos	46
2.6.3	Parâmetros de Escoamentos Bifásicos	48
2.6.4	Velocidade da Mistura	49
2.6.5	Velocidade Drift-flux	50
2.7	Experimentos com Investigação de Frações de Vazios, Comprimentos de Bolhas, Velocidades de Bolhas e Perfis de Bolhas	50
2.8	Princípios de Ondas Ultrassônicas	53
2.8.1	Geração de Ondas Ultrassônicas	53
2.8.2	Fenômeno de Campo Ultrassônico	54
2.8.3	Propagação da Onda Ultrassônica	55
2.9	Técnicas de Medições Ultrassônicas	60
2.9.1	Técnica de Medição Ultrassônica Pulso-eco	61
2.9.2	Técnica de Medição Ultrassônica por Transmissão-Recepção	62
2.9.3	Técnica de Medição Ultrassônica Doppler	63
2.10	Técnica de Aquisições de Imagem	64
3	Equipamento e Técnica Experimental	69
3.1	Preparação do Experimento	70
3.1.1	Enchimento do Circuito Primário	70
3.1.2	Enchimento do Circuito Secundário	75
3.1.3	Posicionamento e Ajuste da Câmera de Alta Velocidade	76

3.1.4	Posicionamento e Ajuste dos Transdutores Ultrassônicos	78
3.1.5	Banho Termostático para Avaliação de Termopares	79
3.1.6	Calibração por Comparação do Sistema de Aquisição de Dados de Temperatura	82
3.1.7	Estimativa da Incerteza na Calibração do SADT	84
3.1.8	Curva de Calibração de Temperatura de Termopares	85
3.2	Operação do Circuito de Circulação Natural - CCN	86
3.2.1	Inicialização do Experimento	86
3.2.2	Sistema de Aquisição e Controle de Dados	89
3.2.3	Interface Gráfica do Sistema de Aquisição e Controle de Dados	89
3.2.4	Sistema de Aquisição de Sinais dos Termopares	90
3.2.5	Operação de Controle de Potência	91
3.2.6	Sistema de Aquisição de Temperatura por Termopares	92
3.2.7	Medição de Vazão de Circulação Natural	94
3.2.8	Procedimento de Gravação e Reprodução de Imagem	94
3.3	Processamento de Imagem pelo Aplicativo em MatLab	97
3.4	Técnica de Medição Ultrassônica	100
3.4.1	Aquisição de Sinais Ultrassônicos	100
3.4.2	Processamento de Sinais Ultrassônicos	101
3.4.3	Cálculo de Parâmetros Bifásicos por Técnica Ultrassônica Tipo Pulso-eco	107
4	Resultados e Discussões	113
4.1	Experimentos em Regime Monofásico	114
4.1.1	Resultados dos Experimentos com Potência de 0,8 kW - $Q_s =$ 6 l/h	114
4.1.2	Resultados dos Experimentos com Potência de 0,4 kW - $Q_s =$ 6 l/h	122
4.1.3	Modificação de Medição de Temperatura na Entrada do Cir- cuito Secundário de Resfriamento	128

4.1.4	Observações Importantes com relação aos Experimentos com Potências de 0,8 kW e 0,4 kW	130
4.1.5	Resultados dos Experimentos com Potência de 1,1 kW - $Q_s = 6$ l/h	134
4.2	Experimentos em Regime Bifásico	143
4.2.1	Quadro Comparativo de Quantidades de Bolhas, para todos os casos	143
4.2.2	Gráfico Comparativo de Quantidades de Bolhas versus Vazões Secundárias, para todos os casos	144
4.2.3	Histogramas de Comprimentos de Bolhas, para todos os casos	144
4.2.4	Análise dos Histogramas de Comprimentos de Bolhas	153
4.2.5	Quadro Comparativo de Médias de Comprimentos de Bolhas, para todos os casos	154
4.2.6	Gráfico Comparativo de Médias de Comprimentos de Bolhas versus Vazões Secundárias	155
4.2.7	Histogramas de Velocidades de Bolhas, para todos os casos	156
4.2.8	Análise dos Histogramas de Velocidades de Bolhas	163
4.2.9	Quadro Comparativo de Velocidades de Bolhas, para todos os casos	166
4.2.10	Gráfico Comparativo de Velocidades de Bolhas versus Vazões Secundárias	166
4.2.11	Médias e Desvios Padrões de Comprimentos de Bolhas e Velocidades de Bolhas	167
4.2.12	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas, para todos os casos	170
4.2.13	Estudos de Casos dos Experimentos	181
4.2.14	Aquisições de Imagens e Perfis Ultrassônicos de Bolhas	181
4.2.15	Aquisições, Processamentos de Imagens e Equações de Perfis de Bolhas	213
4.2.16	Medições de Temperaturas na Perna Quente	221
4.2.17	Resultados de Vazões na Perna Fria	224

4.2.18	Resultados de Comparações de Temperaturas entre Perna Quente e Perna Fria	227
4.2.19	Resultados das Comparações de Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior	234
4.2.20	Vazões de Líquido na Perna Quente	240
4.2.21	Velocidade de Líquido na Perna Quente	241
5	Conclusões e Sugestões	242
5.1	Conclusões	242
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	244
	Referências Bibliográficas	246
A	Modelos Matemáticos de Escoamentos Monofásicos e Bifásicos	257
A.1	Equações de Governo de Circulação Natural Monofásica	257
A.1.1	Equações de Governo de Circulação Natural Bifásica	258
A.2	Modelos Físicos	258
A.2.1	Sistema Monofásico	260
A.2.2	Parâmetros Adimensionais Monofásicos	264
A.2.3	Parâmetros Adicionais	266
A.2.4	Sistema Bifásico	267
A.2.5	Equação de Quantidade de Movimento	270
A.2.6	Parâmetros de Similaridade	272
A.2.7	Equação de Navier-Stokes	273
A.2.8	Equação de Acoplamento	273
A.2.9	Equações de Modelagem	274
A.2.10	Grupos Adimensionais	276
A.2.11	Grupos Adimensionais Acoplados	276

Lista de Figuras

2.1	Esquemático de Sistema Passivo de Remoção de Calor Residual - Fonte Botelho (1993)	9
2.2	Condições Bifásicas de Circulação Natural - Fonte Botelho et al. (2002)	12
2.3	Fenômeno de Circulação Natural	24
2.4	Circuito de Circulação Natural - CCN - Original	38
2.5	Escoamentos Verticais	46
2.6	Mapa de Escoamentos Verticais Comparativos entre Ishii/Mishima e Duckler/Taitel - Fonte Rouhani e Sohal (1983)	47
2.7	Fenômeno de Campo Ultrassônico - Fonte Cunha Filho (2010)	54
2.8	Ondas Transversais e Ondas Longitudinais - Fonte Cunha Filho (2010) 56	
2.9	Difração de Onda ultrassônica - Fonte Cunha Filho (2010)	57
2.10	Incidência e Reflexão de Onda ultrasônica - Fonte Cunha Filho (2010)	57
2.11	Transdutor Ultrassônico - Fonte Cunha Filho (2010)	58
2.12	Técnica Ultrassônica Pulso-Eco - Fonte Ofuchi (2011)	61
2.13	Técnica Ultrassônica por Transmissão-Recepção - Fonte Ofuchi (2011)	63
2.14	Técnica Ultrassônica Doppler - Fonte Paulino (2007)	64
3.1	Laboratório de Termo-hidráulica Experimental	69
3.2	Circuito de Circulação Natural (CCN)	70
3.3	Feixe de Aquecimento por Resistores Elétricos	71
3.4	Detalhe da Montagem do Arranjo dos Resistores de Aquecimento . . .	72
3.5	Detalhe da Montagem do Trocador de Calor	73
3.6	Visor de Vidro - Perna Quente	74

3.7	By-pass - Sistema de Resfriamento Secundário	76
3.8	Curva de Ajuste de Temperaturas de Termopares	86
3.9	Esquemático do Circuito de Circulação Natural - CCN	88
3.10	Sistema de Aquisição e Controle de Dados	89
3.11	Módulo de interface gráfica do sistema de medição e controle	90
3.12	Placa de aquisição de sinais dos termopares	91
3.13	Posições dos Termopares	92
3.14	Mudança de Posição - TC 10	93
3.15	Aplicativo para Processamento de Imagem	98
3.16	Aplicativo para Processamento de Sinais Ultrassônicos	101
3.17	Perfil de bolhas - 0-300 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	102
3.18	Perfil de bolhas - 300-620 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	102
3.19	Perfil de bolhas - 620-920 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	103
3.20	Perfil de bolhas - 900-1200 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	103
3.21	Perfil de bolhas - 1200-1500 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	104
3.22	Perfil de bolhas - 1500-1817 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	104
3.23	Perfil de bolhas - 1815-2100 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	105
3.24	Perfil de bolhas - 2100-2400 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	105
3.25	Perfil de bolhas - 2400-2700 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	106
3.26	Perfil de bolhas - 2700-3200 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	106
4.1	Temperaturas no Downcomer e Saída do Aquecedor - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	115
4.2	Temperatura na Entrada e Saída do Trocador de Calor - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	116
4.3	Temperatura de Fluido e Parede na Perna Quente - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	116
4.4	Temperatura de Fluido na Saída do Aquecedor e Perna Quente - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	117
4.5	Temperatura de Fluido e Parede na Entrada da Perna Fria - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	118

4.6	Temperatura de Fluido e Parede na Saída do Aquecedor - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 6$ l/h	119
4.7	Temperatura de Fluido no Trocador de Calor - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 6$ l/h	119
4.8	Temperatura na Perna Quente e na Entrada da Perna Fria - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 6$ l/h	120
4.9	Temperatura do Fluido no Downcomer e Entrada da Perna Fria - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 6$ l/h	120
4.10	Estabilização de Diferenças de Temperaturas - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 6$ l/h	121
4.11	Vazão de Circulação Natural na Perna Fria - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 6$ l/h	121
4.12	Temperatura no Downcomer e Saída do Aquecedor - $P = 0,4$ kW - $Q_s = 6$ l/h	122
4.13	Temperatura de Fluido e Parede na Perna Quente - $P = 0,4$ kW - $Q_s = 6$ l/h	123
4.14	Temperatura de Fluido e Parede na Entrada da Perna Fria - $P = 0,4$ kW - $Q_s = 6$ l/h	124
4.15	Temperatura de Fluido na Saída do Aquecedor e na Perna Quente - $P = 0,4$ kW - $Q_s = 6$ l/h	125
4.16	Temperatura na Entrada e Saída do Trocador de Calor - $P = 0,4$ kW - $Q_s = 6$ l/h	125
4.17	Temperatura de Fluido e Parede na Saída do Aquecedor - $P = 0,4$ kW - $Q_s = 6$ l/h	126
4.18	Temperatura de Fluido Primário e Secundário no Trocador de Calor - $P = 0,4$ kW - $Q_s = 6$ l/h	127
4.19	Temperatura na Perna Quente e Entrada da Perna Fria - $P = 0,4$ kW - $Q_s = 6$ l/h	128
4.20	Temperatura do Fluido no Downcomer e Entrada da Perna Fria - $P = 0,4$ kW - $Q_s = 6$ l/h	129
4.21	Estabilização de Diferenças de Temperaturas - $P = 0,4$ kW - $Q_s = 6$ l/h	129

4.22	Vazão de Circulação Natural na Perna Fria - $P = 0,4 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	130
4.23	Mudança de Posição do Termopar T10 - $P = 800 \text{ W}$ / $P = 400 \text{ W}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	131
4.24	Comparação de Vazões de Circulação Natural na Perna Fria - $P = 800$ kW / $P = 400 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	131
4.25	Evolução de Temperatura no Percorso Hidráulico - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	132
4.26	Evolução de Temperatura no Percorso Hidráulico - $P = 0,4 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	132
4.27	Temperatura no Downcomer e na Saída do Aquecedor - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	134
4.28	Temperatura de Fluido e Parede na Perna Quente - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	135
4.29	Temperatura de Fluido e Parede na Entrada da Perna Fria - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	136
4.30	Temperatura de Fluido na Saída do Aquecedor e na Perna Quente - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	137
4.31	Temperatura no Trocador de Calor - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	137
4.32	Temperatura de Fluido e Parede na Saída do Aquecedor - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	138
4.33	Temperatura de Fluido no Trocador de Calor - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6$ l/h	139
4.34	Temperatura na Perna Quente e na Entrada da Perna Fria - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	140
4.35	Temperatura do Fluido no Downcomer e Entrada da Perna Fria - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	141
4.36	Estabilização de Diferenças de Temperaturas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6$ l/h	142
4.37	Vazão de Circulação Natural na Perna Fria - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	142
4.38	Quantidades de Bolhas versus Vazões Secundárias, para todos os casos	145

4.39	Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$	. 146
4.40	Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	. 146
4.41	Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	. 147
4.42	Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$	147
4.43	Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$	. 148
4.44	Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	. 149
4.45	Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	. 149
4.46	Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$	150
4.47	Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$	. 150
4.48	Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	. 151
4.49	Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	. 151
4.50	Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$	152
4.51	Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$	. 152
4.52	Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	. 153
4.53	Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	. 153
4.54	Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$	154
4.55	Comprimentos de Bolhas versus Vazões Secundárias, para todos os casos	156
4.56	Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$	. . . 157
4.57	Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	. . . 157
4.58	Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	. . . 158
4.59	Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$	. . . 158
4.60	Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$	. . . 159
4.61	Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	. . . 159
4.62	Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	. . . 160
4.63	Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$	. . . 160
4.64	Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$	. . . 161
4.65	Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	. . . 161
4.66	Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	. . . 162
4.67	Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$	. . . 162
4.68	Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$	. . . 163

4.69	Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$. . .	164
4.70	Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$. . .	164
4.71	Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$. . .	165
4.72	Velocidades de Bolhas versus Vazões Secundárias	167
4.73	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$	171
4.74	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	171
4.75	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	172
4.76	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$	172
4.77	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$	173
4.78	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	174
4.79	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	174
4.80	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$	175
4.81	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$	176
4.82	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	176
4.83	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	177
4.84	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$	177
4.85	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$	178

4.86	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas	
	- $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	178
4.87	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas	
	- $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	179
4.88	Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas	
	- $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$	179
4.89	Bolha 1 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	182
4.90	Bolha 2 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	183
4.91	Bolha 3 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	184
4.92	Bolha 4 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	185
4.93	Bolha 5 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	186
4.94	Bolha 6 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	187
4.95	Bolha 7 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	188
4.96	Bolha 8 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	189
4.97	Bolha 9 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	190
4.98	Bolha 10 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	191
4.99	Bolha 11 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	192
4.100	Bolha 12 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	193
4.101	Bolha 13 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	194
4.102	Bolha 14 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	195
4.103	Bolha 15 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	196
4.104	Bolha 16 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	197
4.105	Bolha 17 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	198
4.106	Bolha 18 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	199
4.107	Bolha 19 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	200
4.108	Bolha 20 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	201
4.109	Bolha 21 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	202
4.110	Bolha 22 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	203
4.111	Bolha 23 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	204
4.112	Bolha 24 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	205
4.113	Bolha 25 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	206

4.114	Bolha 26 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	207
4.115	Bolha 27 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	208
4.116	Bolha 28 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom	209
4.117	Imagem com Escala de Perfil da Bolha 7	214
4.118	Processamento de Imagem de Perfil da Bolha 7	215
4.119	Imagem com Escala de Perfil da Bolha 5	215
4.120	Processamento de Imagem de Perfil da Bolha 5	216
4.121	Imagem com Escala de Perfil da Bolha 6	216
4.122	Processamento de Imagem de Perfil da Bolha 6	217
4.123	Imagem com Escala de Perfil da Bolha 1	217
4.124	Processamento de Imagem de Perfil da Bolha 1	218
4.125	Imagem com Escala de Perfil da Bolha 2	218
4.126	Processamento de Imagem de Perfil da Bolha 2	218
4.127	Imagem com Escala de Perfil da Bolha 3	219
4.128	Processamento de Imagem de Perfil da Bolha 3	219
4.129	Imagem com Escala de Perfil da Bolha 4	220
4.130	Processamento de Imagem de Perfil da Bolha 4	220
4.131	Temperaturas na Perna Quente - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h	222
4.132	Temperaturas na Perna Quente - $P = 1,0$ kW - $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h	222
4.133	Temperaturas na Perna Quente - $P = 0,9$ kW - $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h	223
4.134	Temperaturas na Perna Quente - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h	223
4.135	Vazões na Perna Fria - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h	225
4.136	Vazões na Perna Fria - $P = 1,0$ kW - $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h	225
4.137	Vazões na Perna Fria - $P = 0,9$ kW - $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h	226

4.138	Vazões na Perna Fria - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$, $Q_s = 6 \text{ l/h}$, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12 \text{ l/h}$	226
4.139	Formação de Bolha de Taylor	228
4.140	Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 3$ l/h	228
4.141	Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6$ l/h	229
4.142	Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9$ l/h	229
4.143	Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s =$ 12 l/h	230
4.144	Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 3$ l/h	230
4.145	Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 6$ l/h	231
4.146	Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 9$ l/h	231
4.147	Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s =$ 12 l/h	232
4.148	Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 3$ l/h	232
4.149	Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 9$ l/h	233
4.150	Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s =$ 12 l/h	233
4.151	Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 3 \text{ l/h}$	234
4.152	Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 6 \text{ l/h}$	235
4.153	Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 9 \text{ l/h}$	235

4.154	Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 12$ l/h	236
4.155	Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 1,0$ kW - $Q_s = 3$ l/h	236
4.156	Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 1,0$ kW - $Q_s = 6$ l/h	237
4.157	Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 1,0$ kW - $Q_s = 9$ l/h	237
4.158	Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 1,0$ kW - $Q_s = 12$ l/h	238
4.159	Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 3$ l/h	238
4.160	Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 9$ l/h	239
4.161	Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 12$ l/h	239
4.162	Vazões de Líquido na Perna Quente - $P = 0,9$ kW - $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h	240
4.163	Velocidades de Líquido na Perna Quente - $P = 0,9$ kW - $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h	241

Lista de Símbolos

A	Área de seções transversais de escoamento
a_c	Área transversal de escoamento no reator
Bi	Número de Biot
C_p	Calor específico do refrigerante
D	Diâmetro
D_h	Diâmetro hidráulico
d	Profundidade de condução
d_i	Diâmetro interno
d_T	Diâmetro do tubo do trocador de calor
F	Número de Fricção
Fr	Número de Froude
f	Fator de atrito
G	Vazão volumétrica do refrigerante
Gr	Número de Grashof
g	Aceleração da gravidade
h	Coefficiente de transferência de calor
i	Índice de seções e restrições

j	Índice de seções e restrições
K_1	Coefficiente global de perda de pressão
K_j	Coefficiente de perda de pressão
k	Condutividade térmica
L	Comprimento
L_c	Altura ativa do núcleo do reator
LHR	Altura dos tubos do trocador de calor residual
l_i	Comprimento
M	Vazão nominal do refrigerante
m	Vazão no circuito
N	Número de barras combustíveis no núcleo
N_T	Número de tubos no trocador de calor residual
N_u	Número de Nusselt
P	Pressão
P_r	Número de Prandtl
p	Espaçamento de barras combustíveis
Q	Potência térmica
q_v	Taxa volumétrica de geração de calor
q_w	Fluxo de calor na parede
R	Resistência hidráulica
Ra	Número de Rayleigh
Re	Número de Reynolds

Ri	Número de Richardson
r	Raio
St	Número de Stanton
T	Temperatura
t	Tempo
u_c	Velocidade média do líquido nos canais
V	Volume
V_{gj}	Velocidade drift-flux
W	Vazão de massa do refrigerante

Letras Gregas

α	Difusividade térmica; fração de vazio
β	Coefficiente de Expansão Térmica
ΔL	Diferença de altura entre a base dos tubos do trocador de calor e o centro da seção de aquecimento (reator) do reator
ΔT	Diferença de temperaturas
γ	Relação entre densidades
δ	Profundidade de condução
μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
θ	Temperatura adimensional
ρ	Massa específica do fluido

ρ_f	Densidade do líquido
τ	Tempo adimensional
ξ	Perímetro aquecido
Δ	Varição
Σ	Soma

Subscritos

bc	Barras de combustível
c	Superfície fria
e	Saída
g	Vapor
h	Superfície quente
i	Seção i
in	Entrada
m	Modelo
m	Mistura
o	Seção aquecida
p	Protótipo
R	Razão entre protótipo e modelo
r	Variável representativa
s	Sólido
w	Parede

Capítulo 1

Introdução

A energia elétrica é um elemento indispensável para a sustentação do desenvolvimento social, tecnológico e econômico da população mundial. Entretanto, com o crescimento demográfico e o crescente consumo de energia elétrica, tem-se um permanente desafio na composição de uma matriz energética, que atenda às necessidades de demanda de energia elétrica e a não implicação de impactos ambientais nocivos ao planeta.

O efeito estufa destaca-se como impacto ambiental de maior relevância, em consequência das emissões de gases poluentes produzidos por combustões à base de carvão e derivados de petróleo, entre outros. Como medida corretiva para este problema intensificou-se a realização de pesquisas para utilização de fontes alternativas de energia renováveis.

A substituição do carvão e derivados do petróleo na geração de energia elétrica modificou a matriz energética a partir da utilização de geração de energia elétrica por fontes renováveis, tais como eólica e solar. Entretanto, estas fontes apresentam comportamento instável em razão da instabilidade climática e além disso, por exigir grandes extensões territoriais e posições geográficas específicas para sua implantação, em função da exigência de grandes níveis de potência elétrica. Um outro fator adverso é a relação custo-benefício, em relação às exigências de geração de altos níveis de potência elétrica.

Em particular, a área de energia nuclear é uma alternativa técnica, que implica em impacto ambiental negativo desprezível em condições normais de operação,

levando-se em conta os impactos provocados por fontes como carvão e petróleo. Apesar de ocorrência de reduzido número de acidentes nas usinas nucleares, os acidentes de Three Miles Island (Estados Unidos), Chernobil (União Soviética) e, recentemente, Fukushima (Japão), criaram expectativas desagradáveis para o uso da energia nuclear. Acidentes nucleares desencadeiam uma grande comoção mundial com repercussões negativas na sociedade, onde manifestações por mídia, organizações não governamentais ou diretamente pela população, geram posições contrárias à manutenção e/ou construção de instalações nucleares.

A comunidade científica atuante na área de energia nuclear intensifica pesquisas na identificação das causas de acidentes nucleares e adotam soluções calcadas, tanto na modificação da filosofia de projetos quanto na adoção de inovações tecnológicas, com o intuito de garantir o funcionamento seguro das instalações nucleares.

Os temas das pesquisas abrangem estudos de circulação natural monofásica e bifásica, análises de instabilidades para cada tipo de escoamento, análises de parâmetros de similaridades e escalonamentos, estudo de comportamento de temperatura em regime transitório e estacionário, análises de parâmetros interfaciais, simulações com códigos computacionais, estudos de comportamento de vazão de circulação natural em função da potência elétrica e potência térmica.

Os reatores nucleares avançados e inovadores são apresentados como soluções para a garantia de segurança de instalações nucleares na geração de energia elétrica, de modo a viabilizar sua utilização em regiões de grande densidade demográfica, com a redução de probabilidade de acidentes, de não emissão de radioatividade e de não contaminação da fauna e flora. Os sistemas de remoção de calor residual aplicados aos reatores nucleares avançados de água pressurizada, têm por função a retirada de calor produzido pelo decaimento do combustível nuclear.

Uma inovação tecnológica de grande relevância na área nuclear, consiste na utilização do conceito de circulação natural aplicado ao sistema passivo de remoção de calor residual. Este sistema está incorporado ao reator avançado de água pressurizada (APWR) como dispositivo de segurança, para operar em condição de subcriticalidade na parada programada ou em emergência. Este sistema tem por função retirar do fluido primário o calor gerado pelas reações nucleares em decaimento de

potência, através de um trocador de calor conectado às pernas quente e fria do reator nuclear. A circulação natural aplicada ao sistema passivo de remoção de calor residual, transfere o calor na saída do núcleo do reator, escoando pela perna quente em direção ao trocador de calor, por conta da diminuição da densidade do fluido e do desnível entre o núcleo e o trocador de calor.

A realização de experimentos para estudos do comportamento da circulação natural em sistemas de remoção de calor residual, utilizando protótipos de instalações nucleares integrais, torna-se proibitivo em razão de alto custo e dos fatores de risco. Ao longo de décadas os experimentos são realizados em instalações experimentais, que apresentam características de similaridade e escalonamento em relação às instalações nucleares integrais, fazendo uso de fontes de diferentes valores de potência elétrica, de geometrias de circuitos e de volumes de fluido.

A remoção de calor executada em regime estacionário depende do tipo de acidente para o qual este sistema esteja atuando, e o intervalo de tempo de funcionamento pode provocar alterações nos padrões de escoamentos do fluido primário. Este fato pode contribuir para que o fluido atinja a sua temperatura de saturação, condição indesejável para resfriamento do núcleo do reator. Portanto, é de suma importância a execução de experimentos para observação do comportamento do sistema em condições de escoamento bifásico, em instalações experimentais que tenham comportamentos similares aos protótipos deste tipo de reator nuclear.

Em instalações nucleares a ocorrência de acidentes pode provocar perda de fluido refrigerante, e em consequência, pela queda de pressão no sistema primário, modificar o padrão de escoamento do circuito hidráulico de monofásico para bifásico. O surgimento de escoamento bifásico implica na diminuição da eficiência na capacidade de troca de calor, o que representa riscos à toda estrutura física do reator nuclear, devido às instabilidades e vibrações mecânicas, causadas por intermitência nos padrões de escoamentos bifásicos.

O Circuito de Circulação Natural (CCN), utilizado nos experimentos deste trabalho, funciona de forma similar e apresenta comportamento bem próximo ao existente no sistema passivo de remoção de calor residual, com a vantagem de trabalhar sob pressão atmosférica e tendo água destilada como fluido. Portanto, estudar estes

comportamentos em condição de escoamento bifásico, uma situação de maior complexidade, cria expectativas e motivações para extração de informações relevantes ao estudo de circulação natural bifásica.

O padrão de escoamento bifásico do tipo intermitente observado nos experimentos, tem como característica principal a complexidade relativa aos processos de instabilidade das fases de vapor e líquido, e os fenômenos interfaciais consequentes da não uniformidade de interação das fases. Neste tipo de escoamento observa-se normalmente a existência de padrões de escoamento do tipo bolhas de Taylor e do tipo pistonado. Como o comprimento e velocidade de bolha e pistões de líquido interferem diretamente nos processos de troca de calor, a identificação destes padrões de escoamentos é de grande importância nos estudos aplicados às instalações nucleares.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo apresentar resultados decorrentes da execução de experimentos no Circuito de Circulação Natural (CCN), utilizando técnicas ultrassônicas e de visualização, para observação do comportamento de regimes de escoamentos verticais em circulação natural bifásica e determinação de parâmetros interfaciais.

Os experimentos utilizam combinações de quatro potências elétricas com quatro vazões secundárias de resfriamento. Os experimentos são executados para obtenção de dez ciclos de aquisições de imagens e de sinais ultrassônicos, para após o devido processamento, gerar valores de quantidades, comprimentos e velocidades de bolhas, correlações entre velocidades e comprimentos de bolhas, vazões de circulação natural na perna quente e determinação de frações de vazios. Além disso, é previsto a execução de medições de temperaturas por termopares e medições de vazões de circulação natural na perna fria.

A metodologia experimental está baseada na aquisição e processamento de imagens através de câmera digital de alta velocidade, com visualização de regimes de escoamentos. O processamento de imagem é utilizado para determinação de quan-

tidades, comprimentos e velocidades de bolhas, para análise de perfil de bolha em função do diâmetro, para construções de histogramas de comprimentos de bolhas, de histogramas de velocidades de bolhas e de gráficos de correlações entre comprimentos e velocidades de bolhas. A aquisição de sinais ultrassônicos permite a obtenção dos resultados de frações de vazios por técnica ultrassônica não invasiva do tipo pulso-eco. A utilização de técnica não invasiva garante maior segurança, facilidade de instalação e operação.

Além das técnicas citadas são utilizados procedimentos para medições de temperaturas por termopares ao longo do circuito hidráulico, medições de vazões de circulação natural na perna fria através de medidor eletromagnético e medições de vazões de circulação natural na perna quente por medidor ultrassônico Doppler.

Em resumo, o estudo de parâmetros de bolhas possibilita analisar as condições dos experimentos, sob situações diversas e inferir informações do comportamento do circuito termo-hidráulico, através de combinações das variáveis de entrada.

1.2 Organização do Trabalho

No capítulo 2 são apresentados os fundamentos de sistema de remoção de calor residual, regimes e padrões de escoamentos bifásicos, de circulação natural bifásica, do projeto do Circuito de Circulação Natural (CCN), dos parâmetros de escalas e similaridades, das técnicas e medições ultrassônicas, técnicas de visualização e informações técnicas sobre fenômenos. Além disso, são citados trabalhos de relevância para sustentação dos conceitos e técnicas, com os resumos dos estudos teóricos e experimentais realizados por diversos pesquisadores.

No capítulo 3 é apresentada a descrição da instalação experimental do Circuito de Circulação Natural (CCN), contemplando os dados técnicos dos principais componentes do circuito termo-hidráulico, procedimentos de operação e medição, descrição dos elementos de medição e sensores, além dos elementos de técnicas de medições e de visualização. O procedimento de cálculo de parâmetros interfaciais a partir de aquisições de sinais ultrassônicos, encontra-se apresentado de forma detalhada para comprovação de resultados obtidos.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e respectivas discussões, contemplando os experimentos finais realizados em condições de regime de escoamento bifásico.

No capítulo 5 conclui-se a importância do trabalho no contexto da contribuição para o estudo da circulação natural em instalação experimental escalonada. Além de sugestões para trabalhos futuros.

No apêndice, é apresentado um trabalho sobre resultados de modelagem matemática de circulação natural em condições de regimes de escoamentos monofásicos e bifásicos.

Capítulo 2

Fundamentos e Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são abordados assuntos alusivos à proporcionalidade entre circuito de remoção de calor residual do reator avançado de água pressurizada (AP600) e o Circuito de Circulação Natural (CCN), através dos parâmetros de similaridades e de escalas, necessários no projeto e construção desta instalação experimental. O fenômeno de circulação natural e sua interação com outros fenômenos, foi estudado de forma a apresentar sua fenomenologia e sua modelagem matemática, sob a forma de diversos estudos teóricos e experimentais realizados, para possibilitar um melhor entendimento sobre a complexidade e importância deste assunto, principalmente em condições de escoamento bifásico. A instalação experimental utilizada está devidamente apresentada em termos de modelo em projeto termo-hidráulico, que a habilita ser estudada de forma qualitativa por similaridade e escalonamento, em relação ao sistema passivo de remoção de calor residual do reator nuclear avançado já citado.

Uma extensa revisão bibliográfica de instalações experimentais integrais, escalonadas e similares, é apresentada para comprovação de simulações e experimentos relacionados à circulação natural, envolvendo também a análise dos comportamentos dos escoamentos monofásicos e bifásicos observados. Cabe ressaltar a importância destas instalações, em relação aos resultados de experimentos e simulações que são utilizados para composição dos acervos científico e tecnológico, e que possibilitam a validação de modelos e códigos computacionais aplicáveis na certificação de instalações nucleares. Além disso, a extrapolação dos resultados e observações para as instalações reais, desde que os devidos cuidados sejam tomados em relação às aprox-

imações, possibilita a incorporação de inovações nos projetos de reatores nucleares.

Para o estudo experimental do circuito de circulação natural foram mencionados, os princípios teóricos fundamentais de escoamentos bifásicos, das principais técnicas de medições, que permitiram a observação dos fenômenos e determinação dos valores de variáveis hidrotermodinâmicas. Dentre estas técnicas, foram estudadas as técnicas de medições ultrassônicas e técnicas de visualização de imagem em alta velocidade.

2.1 Sistema Passivo de Remoção de Calor Residual

O sistema passivo de remoção de calor residual é composto por um trocador de calor, instalado no tanque de armazenamento de água de recarga de combustível, por tubulações da perna quente e perna fria para interligação do trocador de calor ao núcleo do reator. Para o adequado funcionamento deste circuito, a parte inferior do trocador de calor deve situar-se em posição acima do circuito primário, de modo a que possa surgir uma vazão de circulação natural necessária ao resfriamento do núcleo. O trocador de calor entra em operação, a partir do desligamento da bomba primária de resfriamento do núcleo. A circulação forçada da vazão do fluido de resfriamento primário pela bomba primária, segue o sentido da perna fria para a perna quente. A vazão de circulação natural por sua vez percorre o circuito hidráulico, da perna quente para a perna fria. Na Figura 2.1, é mostrado o esquemático do sistema de remoção de calor residual do reator avançado de água pressurizada (APWR).

Estudos de sistemas passivos de remoção de calor residual em PWR de Baixa Energia foram elaborados por Kocamustafaogullari e Ishii (1984) e Ishii e Kataoka (1984), através da realização de simulações termo-hidráulicas baseadas em conceitos de escala de 1 : 2, utilizando um circuito experimental com quatro loops. Uma das simulações foi realizada com o emprego de equações da continuidade, equações de momento e energia, levando em consideração a área média para as condições de escoamento monofásico. Em outra simulação foi aplicado o modelo drift-flux com média temporal de curta duração, utilizando também a área média para as condições de escoamento bifásico. Tanto o modelo quanto às equações foram utilizados na

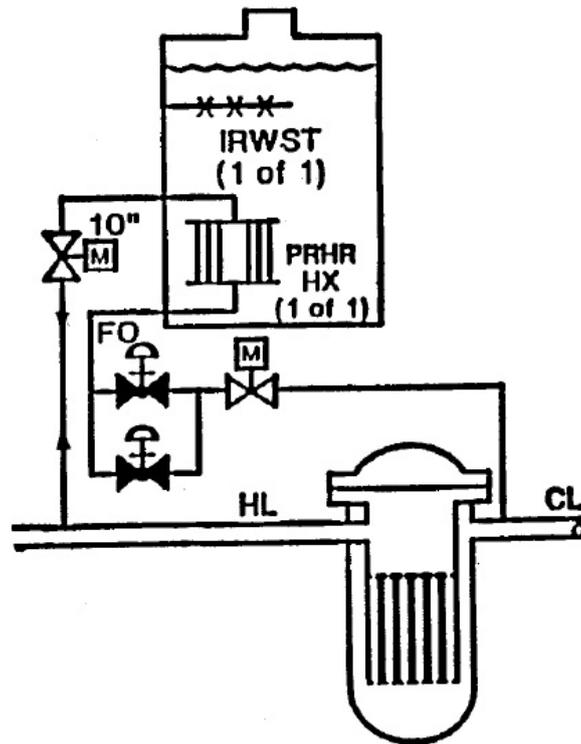


Figura 2.1: Esquemático de Sistema Passivo de Remoção de Calor Residual - Fonte Botelho (1993)

forma uni-dimensional. Os cálculos numéricos foram realizados com o intuito de atender aos requisitos de similaridade e critérios de escala, em condição de circulação natural. O circuito permitiu identificar condições de redução do percurso hidráulico para estabelecer a validade da remoção de calor residual sob condições de acidente.

Um trabalho de investigação de remoção de calor por circulação natural com perda de refrigerante foi apresentado por Murao et al. (1995), utilizando uma instalação construída em função de critério de escalonamento de potência, com envolvimento de mistura natural de calor gerado no núcleo com calor removido. Neste trabalho foram apresentados resultados de coeficientes de reatividade, densidade do moderador, temperatura do combustível e geradores de vapor. No sistema passivo de injeção de refrigerante foram utilizados resfriadores a ar em função da expansão do refrigerante primário para resfriamento do sistema. Um dos resultados dos experimentos foi descrito por gráfico de elevação brusca de temperatura/calor (burn-up) versus coeficiente de reatividade de densidade. Outros resultados obtidos foram de

scritos pelas condições de potências do reator versus temperaturas do fluido. Um outro estudo de grande importância empregou coeficiente normalizado de reatividade de densidade versus percentual inercial, além de potência inicial normalizada versus tempo de início de um LOCA (Loss of Coolant Accident). Uma decisiva contribuição para avaliação de acidente com perda de refrigerante no reator nuclear e variação de pressão em função do tempo (remoção de calor).

Um resumo do estado da arte levando em conta os conceitos e análises em escala foi apresentado por Reyes e Hochreiter (1998), envolvendo projeto da instalação e diversas condições de teste para Planta Experimental Avançada (APEX). Este trabalho foi de grande importância para estabelecimento de representação geométrica precisa do sistema de geração de vapor do AP 600 para desenvolvimento de códigos computacionais. O estudo constituiu-se em importante referência para desenvolvimento de sistemas passivos de remoção de calor residual. A instalação do protótipo foi concebida a partir do projeto dos componentes do circuito hidráulico, em função das características de similaridades dos parâmetros termo-hidráulicos em condições de escoamentos monofásico e bifásico, em relação à instalação integral do reator nuclear.

Os conceitos de segurança passiva com extensa aplicação nos projetos das futuras gerações de planta de energia nuclear, foram estudados por Jiang et al. (2000) utilizando PWR avançado. A remoção de calor por decaimento no núcleo do reator pelo escoamento de refrigerante por circulação natural após um acidente, contribuiu para o aumento de confiabilidade de sistemas de engenharia de segurança, proporcionando a redução de ocorrência de derretimento do núcleo, a partir do emprego de sistemas de proteção e controle mais simples e econômicos. Esta pesquisa experimental e análise teórica foi de responsabilidade do Instituto de Energia Nuclear da China (NPIC), com o realce das características passivas de reatores avançados PWR AC 600/1000. Os testes foram realizados para estudo da remoção de calor residual efetuada pelo lado secundário do gerador de vapor, e análise do comportamento do tanque de compensação do núcleo e da ventilação da contenção para remoção de calor. Além disso, foram executados testes para estudo das características de circulação natural do sistema com funcionamento simultâneo do circuito

do lado secundário do gerador de vapor, além do circuito de fluxo de ar para sistema de remoção de calor residual em emergência (ERHRS), depois de parada por desligamento da Estação (shut-down). O estudo compreendeu a observação do comportamento do fluxo de água do sistema de resfriamento primário, através do tanque de compensação do núcleo, do pressurizador, do acumulador e do uso da pressão do reator depois de breve acidente. O estudo também foi importante para o desenvolvimento de código computacional para simulação das condições de acidentes. Este trabalho foi fruto de parceria entre o NPIC e o Centro de Tecnologia Karlsruhe da Alemanha, para desenvolvimento de pesquisa das características da circulação natural de ar no canal anular entre o revestimento em aço de paredes e paredes de concreto da contenção.

Estudos de comportamento de escoamentos em termos de conceitos de sistema de remoção passiva, por circulação natural, foram estudados por Cherubini et al. (2008), envolvendo escoamentos monofásicos e bifásicos, levando em conta o inventário de massa, em função da relação entre vazão de circulação natural e potência térmica no núcleo. Os principais efeitos de aspectos de simulação com simuladores de PWR: Semiscale, Spes, Lobi, Bethsy, Pkl e Lstf, foram apresentados para análise e conclusão do desempenho das instalações simuladas. Nas simulações foram utilizados mapas de vazões em circulação natural, com a apresentação de tabela comparativa de seis instalações integrais, de acordo com as características dos tipos de reatores nucleares e respectivas potências geradas. Uma breve revisão bibliográfica foi apresentada a respeito de escoamentos monofásicos, de escoamentos bifásicos estáveis, de efeitos de condensação por sifão, de condensação por refluxo de vazão, por ocorrência de dry-out. A análise das simulações que foram executadas procurou enquadrar todos os resultados obtidos, dentro da região limite do mapa padrão de escoamento de circulação natural, como forma de obter um alcance mais próximo das condições reais de funcionamento dos reatores.

2.1.1 Bases de Projeto de Sistemas Passivos de Remoção de Calor Residual

No projeto e construção do Circuito de Circulação Natural (CCN), foi de vital importância as pesquisas executadas e registradas no trabalho de Botelho (1992) e Botelho (1993), que estudou o sistema passivo de remoção de calor residual em PWR de Baixa Energia, utilizando os conceitos definidos pelos critérios de Ishii e Kataoka (1984). O circuito da Figura 2.2 foi elemento base para obtenção de dados importantes para aplicações em modelos apropriados, envolvendo as relações de escalas para as diversas variáveis do processo. Com isto, consegue-se identificar o adequado conhecimento do comportamento da circulação natural, através de experimentos e simulações no Laboratório de Termo-Hidráulica Experimental.

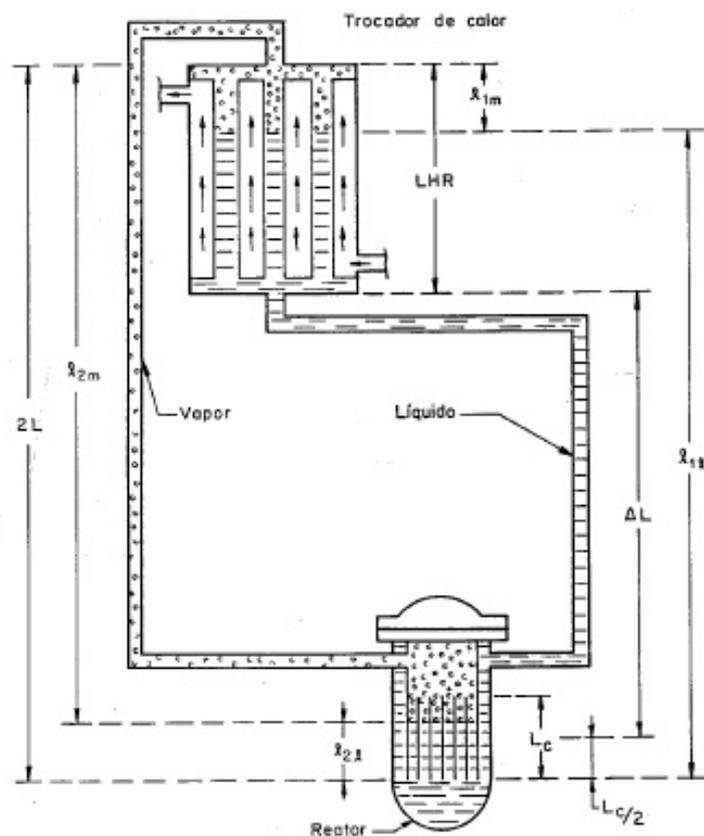


Figura 2.2: Condições Bifásicas de Circulação Natural - Fonte Botelho et al. (2002)

O dimensionamento da instalação de remoção de calor residual tem por base as equações de conservação de momento e energia, para as condições de circulação natural. O cálculo da vazão de circulação natural em condição de sub-criticalidade do reator, em condições de parada, leva em conta os parâmetros de alterações do comportamento do fluido, de geração de calor no núcleo e efeitos de gravidade, conforme a Equação 2.1.

$$m = \left[\frac{2\rho_f^2 g \beta \Delta l Q}{(K_1/a_c^2) C_{pf}} \right]^{1/3} \quad (2.1)$$

A vazão de circulação natural funciona com elemento de transporte de calor para a execução de troca de calor entre os sistemas primário e secundário. Para o adequado rendimento sistema é, portanto, necessário que os efeitos de fricção, em relação às condições de parede e diâmetro da tubulação, mantenham um equilíbrio dinâmico com efeitos de condução de calor para a minimização dos efeitos de perda de carga, conforme a Equação 2.2.

$$\frac{K_1}{a_c^2} \equiv \sum_i f_i \frac{l_i}{d_i a_i^2} + \sum_j \frac{K_j}{a_j^2} \quad (2.2)$$

Os efeitos de altura e comprimento, em relação às condições de troca de calor entre os sistemas primário e secundário, deve manter um equilíbrio dinâmico para proporcionar a adequada circulação natural em função das carga equivalente de empuxo, conforme a Equação 2.3.

$$\Delta l \equiv \Delta L + L' \quad (2.3)$$

O trocador de calor deve apresentar um desnível compatível os efeitos de empuxo e gravidade, de modo que a altura, em relação às condições de troca de calor entre os sistemas primário e secundário, seja adequada à remoção do calor adicionado ao sistema pela potência de decaimento de das reações nucleares. A utilização da equação é destinada ao cálculo de incremento aparente de elevação no trocador de calor para remoção de calor residual, conforme a Equação 2.4.

$$L' \equiv L \left[\frac{LHR/L}{1 - \exp\left(-\frac{LHR}{L}\right)} - 1 \right] \quad (2.4)$$

Os efeitos do percurso da vazão de circulação natural, deve apresentar uma resistência hidráulica, adequadamente dimensionada pela equação destinada ao cálculo do comprimento característico, conforme a Equação 2.5.

$$L \equiv \frac{mC_{pf}}{\pi N_T d_T h} \quad (2.5)$$

O limite de variação de temperatura no refrigerante, deve ser calculado em função da quantidade de calor, efeitos de condução de calor e efeitos de comprimento do circuito termo-hidráulico, conforme a Equação 2.6.

$$\Delta T = \frac{Q}{mC_{pf}} = \left(\frac{Q}{mC_{pf}} \right)^{2/3} \left(\frac{K_1/a_c^2}{2\pi g \beta \Delta l} \right)^{1/3} \quad (2.6)$$

O limite de variação de temperaturas médias entre combustível e refrigerante, no núcleo do reator, deve ser calculado em função dos coeficientes de transmissão de calor das barras de combustível, do fluido refrigerante, do material de revestimento do combustível e das paredes do vaso do reator, conforme a Equação 2.7.

$$\Delta T_c \equiv \bar{T}_c - \bar{T}_f = \left[\frac{1}{8\pi k_c} + \frac{1}{2\pi r_1 h_1} + \frac{1}{2\pi r_2 h_2} \right] \frac{Q/N_{bc}}{l_c} \quad (2.7)$$

2.1.2 Parâmetros de Similaridade Monofásica

Um estudo de circulação natural foi apresentado por Kumar et al. (2000), envolvendo a discussão sobre uso de modelos unidimensionais de códigos computacionais, para a análise de comportamento das simulações, englobando convecção natural e forçada. Códigos computacionais sofisticados foram utilizados nas simulações de loops de circulação natural monofásicos. As simplificações dos efeitos de convecção através da parede e do fluido foram questionados, em relação à sua influência no resultado final. O trabalho ainda incluiu a execução de simulações com o software Fluent. A modelagem do processo foi obtida após as devidas simplificações referentes aos fenômenos térmicos. Os valores de temperaturas foram registrados ao longo do tempo para a observação de seu comportamento. O número de Reynolds foi calculado em função do Número de Grashof. Além disso, foram observados os

comportamentos da vazão mássica, das diferenças de pressões e das de temperaturas, todas em função do tempo.

Número de Richardson

O número de Richardson é definido pela razão entre a força gravitacional e de inércia, com o intuito de permitir a identificação da influência da densidade na estabilidade do fluido, conforme a Equação 2.8.

$$Ri \equiv \frac{g\beta\Delta T\Delta l}{u^2} \quad (2.8)$$

Número de Fricção

O número de fricção é dimensionado através da razão entre a força de atrito e de inércia, de modo a proporcionar a representação da perda de pressão, de acordo com a Equação 2.9.

$$F_i \equiv \left[\left(\frac{fl}{d_h} \right) + K \right]_i \quad (2.9)$$

Número de Stanton

O número de Stanton estabelece a razão entre a fluxo transversal de calor no sólido e fluxo de calor transportado pelo escoamento, conforme mostrado na Equação 2.10.

$$St \equiv \frac{4h_f l_c}{\rho_f C_{pf} u_c d_h} \quad (2.10)$$

Número de Razão de Tempo

O número de razão de tempo é a relação entre o tempo de escoamento do fluido e o tempo de condução de calor, de acordo com o definido na Equação 2.11.

$$t^* \equiv \frac{l_c/u_c}{\delta^2/\alpha_s} \quad (2.11)$$

Número de Biot

O número de Biot define a razão de transferências de quantidade de calor ao fluido pela quantidade de calor de condução pelo sólido, através da Equação 2.12.

$$Bi = \frac{h_f \delta}{K_s} \quad (2.12)$$

Número de Fonte de Calor

O número de fonte de calor expressa a razão de geração de calor no sólido pela quantidade de calor de convecção pelo sólido, conforme a Equação 2.13.

$$Q_s = \frac{q_c l_c / \rho_s C_{ps}}{U_c \Delta T} \quad (2.13)$$

2.1.3 Parâmetros adicionais

Estudos sobre reator inovador CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares) foram desenvolvidos por Delmastro (2000), que utilizou sistema primário integrado auto-pressurizado, sistema de circulação de refrigerante do sistema primário de circulação natural e diversos sistemas de segurança passiva. O comportamento termo-hidráulico do reator foi simulado com códigos numéricos genéricos, para a análise de situações transitórias ou de acidentes. O circuito de convecção natural de alta pressão foi construído para a obtenção de dados para verificação de parâmetros termo-hidráulicos, com destaque para sua resposta dinâmica. As validações dos procedimentos de cálculo e dos códigos foram executadas com valores próximos aos estágios de operação do reator. O trabalho apresentou uma visão geral dos aspectos termo-hidráulicos do reator, através de estudos dinâmicos, analíticos e experimentais.

A profundidade de condução de calor pode ser calculada, utilizando-se a Equação 2.14.

$$\delta \equiv \frac{a_s}{\xi} \quad (2.14)$$

O diâmetro hidráulico foi elaborado para cálculo com base na Equação 2.15.

$$d_h = \frac{4a}{\xi} \quad (2.15)$$

A Equação 2.16 expressa o cálculo da razão entre perímetro molhado e diâmetro hidráulico.

$$\frac{\xi}{d_h} = \frac{a_s/a}{4} \quad (2.16)$$

A velocidade do fluido no reator pode ser calculada, com a utilização da Equação 2.17

$$u_c = \left[2g\beta (q_c l_c \Delta l / \rho_f C_{pf}) (a_{so}/a_o) / \sum_i (F_i/A_i^2) \right]^{1/3} \quad (2.17)$$

Escala de área de escoamento

A razão entre as seções transversais frias e aquecidas do circuito hidráulico, é calculada a partir da Equação 2.18.

$$A_i \equiv \frac{a_i}{a_o} \quad (2.18)$$

A Equação 2.19 é utilizada para cálculo de variação de temperatura no fluido.

$$\Delta T = (q_c l_c / \rho_f C_{pf} u_c) (a_{so}/a_o) \quad (2.19)$$

Escala de comprimento

A razão entre os comprimentos dos circuitos frios e aquecidos é definida, conforme a Equação 2.20.

$$L_i \equiv \frac{l_i}{l_o} \quad (2.20)$$

2.1.4 Critérios de Similaridade

Os critérios de similaridades tem por objetivo o estabelecimento de um padrão de equiparação entre as instalações. O termo R expressa a relação entre reator e protótipo ou protótipo e instalação experimental.

A relação entre as seções transversais frias e aquecidas do circuito hidráulico do reator, devem atender à Equação 2.21 para os circuitos serem considerados similares.

$$A_{iR} = 1 \quad (2.21)$$

Os comprimentos dos circuitos frios e aquecidos devem manter uma razão compatível com Equação 2.22, para atenderem ao requisito de similaridade.

$$L_{iR} = 1 \quad (2.22)$$

A razão entre o tempo de escoamento do fluido e o tempo de condução de calor será considerada uma similaridade se compatível com a Equação 2.23.

$$t_R^* = 1 \quad (2.23)$$

A relação entre as transferências de quantidade de calor ao fluido e quantidade de calor de condução pelo sólido, deverá estar de acordo com a Equação 2.24.

$$Bi_R = 1 \quad (2.24)$$

A razão de geração de calor no sólido e a quantidade de calor de convecção pelo sólido será considerada similar, se atender à Equação 2.25.

$$Q_{sR} = 1 \quad (2.25)$$

A relação entre a fluxo transversal de calor no sólido e fluxo de calor transportado pelo escoamento, deverá atender à Equação 2.26.

$$St_R = 1 \quad (2.26)$$

A razão entre a força de atrito e de inércia e a representação da perda de pressão é definida similaridade, de acordo com o atendimento à Equação 2.27.

$$F_{iR} = 1 \quad (2.27)$$

Para atendimento de completa similaridade é necessário o atendimento das condições abaixo:

O cálculo de velocidade do fluido no reator é executado pela Equação 2.28, considerando a relação entre reator e protótipo.

$$u_R = [\beta q_c l_c \Delta l / \rho_s C_{ps}]_R^{1/3} \quad (2.28)$$

Utilização da Equação 2.29 define a similaridade completa para cálculo de variação de temperatura no fluido.

$$\Delta T_R = [q_c l_c / \rho_s C_{ps} u]_R \quad (2.29)$$

O cálculo de profundidade de condução, relacionando o circuito hidráulico do protótipo e a instalação experimental, pode ser calculado na forma da Equação 2.30.

$$\delta_R = (\alpha_s l_c / u)_R^{1/2} \quad (2.30)$$

O cálculo do diâmetro hidráulico foi elaborado com base na Equação 2.31, com a relação entre o circuito hidráulico do protótipo e a instalação experimental.

$$d_{hR} = [(\rho_s C_{ps}) / (\rho_f C_{pf})]_R (\alpha_s l_c / u)_R^{1/2} \quad (2.31)$$

O cálculo de transferência de calor no fluido, é executado com base na Equação 2.32, e na relação entre o circuito hidráulico do protótipo e a instalação experimental.

$$h_R = k_{sR} (u / l_c \alpha_s)_R^{1/2} \quad (2.32)$$

Razão entre os comprimentos e áreas dos circuitos frios e aquecidos, do circuito hidráulico do protótipo e a instalação experimental, conforme a Equação 2.33.

$$\left(\frac{l_i}{l_o} \right)_R = \left(\frac{a_i}{a_o} \right)_R = 1 \quad (2.33)$$

2.1.5 Parâmetros de Similaridade Bifásica

No estudo de similaridade deve ser considerada a condição de similaridade em escoamento bifásico, porque o projeto do circuito hidráulico deve atender tanto ao

funcionamento da instalação experimental em condição monofásica quanto bifásica, para permitir uma análise ampla em condição de teste.

Número de Mudança de Fase

O número de mudança de fase é a relação entre a energia resultante da mudança de fase no circuito hidráulico e a transferência de calor ao sistema, conforme a Equação 2.34.

$$N_{pch} \equiv \left(\frac{4q_o \delta l_o}{d_{ho} u_o \rho_f \Delta h_{fg}} \right) \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_g} \right) \quad (2.34)$$

Número de Sub-Resfriamento

O número de sub-resfriamento é definido pela relação entre os efeitos do fluido monofásico devido ao sub-resfriamento e à entrada de líquido, conforme mostrado na Equação 2.35.

$$N_{sub} \equiv \left(\frac{\Delta h_{sub}}{\Delta h_{fg}} \right) \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_g} \right) \quad (2.35)$$

Número de Froude

O número de Froude estabelece a relação entre a força de inércia da fase de líquido e a força gravitacional da fase de vapor, conforme a Equação 2.36.

$$N_{Fr} \equiv \left(\frac{u_o^2}{g l_o} \right) \left(\frac{\rho_f}{\alpha_o \Delta \rho} \right) \quad (2.36)$$

Número de Drift-Flux

O número de drift-flux é a relação entre o movimento relativo entre a fase de líquido e a fase de vapor, para caracterização do escoamento bifásico, conforme definido na Equação 2.37.

$$N_d \equiv \frac{V_{gj}}{u_o} \quad (2.37)$$

Número de Razão de Tempo

O número de razão de tempo é a relação entre o tempo de escoamento do fluido e o tempo de condução de calor, conforme a Equação 2.38.

$$t^* \equiv (l_o/u_o) / (\delta^2/\alpha_s) \quad (2.38)$$

Razão de Inércia Térmica

A razão de inércia térmica é a relação entre o calor acumulado no sólido e o calor transportado por convecção pelo líquido no canal, conforme a Equação 2.39.

$$N_{th} \equiv \frac{\rho_s C_{ps} \delta}{\rho_f C_{pf} d_h} \quad (2.39)$$

Número de Fricção

O número de fricção é a razão entre a força de atrito e a inércia no fluido, conforme pode ser visto na Equação 2.40.

$$N_{fi} \equiv \left(\frac{fl}{d_h} \right)_i \left[\frac{1 + x\Delta\rho/\rho_g}{(1 + x\Delta\mu/\rho_g)^{0,25}} \right]_i (a_o/a_i)^2 \quad (2.40)$$

Número de Orifício

O número de orifício também expressa a relação entre a força de atrito e inércia no fluido, mas de acordo com a Equação 2.41.

$$N_{oi} \equiv K_i [1 + x^{3/2} (\Delta\rho/\rho_g)]_i (a_o/a_i)^2 \quad (2.41)$$

Verificações teóricas para estudo das influências de parâmetros de escoamento bifásico, tais como: fator de atrito, diferença de velocidades, parâmetro de distribuição de vazão e estabilidade da ebulição de sistema de circulação natural bifásico, foram estudadas por Nayak et al. (2007), que utilizou modelo teórico, levando em conta quatro equações drift-flux para solução de equações de conservação de massa, momento e energia. Aplicou os conceitos de linearização em ebulição de sistemas

de circulação natural bifásica. Na modelagem dos circuitos foram incluídas as instabilidades Tipo I e II, para ampla faixa de pressões de operação. O estudo de perda de pressão em escoamento bifásico foi estudado, utilizando os diferentes modelos de fator de atrito, e principalmente, a influência destes modelos em relação à instabilidade do Tipo II. Foram obtidos resultados de fração de vazio em função da velocidade drift e parâmetros de distribuição de vazio em escoamento bifásico, nas suas variações e efeitos na estabilidade do escoamento de circulação natural. Estudou ainda a redução de regiões instáveis nas instabilidades de escoamentos do Tipo I e II, em sistemas de circulação natural bifásica. O efeito do diâmetro do circuito nas instabilidades foi também objeto de estudo. O estudo verificou a importância do diâmetro reduzido nas instalações experimentais do protótipo, para simular instabilidades em circulação natural. O estudo verificou a influência do aumento do diâmetro do circuito no aumento das instabilidades.

2.2 Fenômeno de Circulação Natural

A circulação natural é aplicável no resfriamento do núcleo, em condição normal de acidente ou parada programada, visando o aumento de segurança em instalações nucleares. Com isto, toda a instrumentação, alimentação elétrica e respectivos elementos de proteção e controles necessários para funcionamento das bombas de resfriamento puderam ser descartados, propiciando economia e facilidade de operação e manutenção. Em caso de desligamento por acidente, que constitui-se na maior preocupação em termos de manutenção do sistema de resfriamento do núcleo do reator, a circulação natural é utilizada para substituir a circulação forçada do refrigerante por bomba primária de resfriamento do núcleo.

Os conceitos básicos de instabilidades termo-hidráulicas, presentes na partida de reatores e seus mecanismos, foram estudados por Chiang et al. (1993), que identificou seu aparecimento e apresentou medidas preventivas para proporcionar maior segurança de operação. Os experimentos foram executados para identificação de oscilações de circulação natural, em função da variação de potência, do sub-resfriamento e do comprimento não aquecido. As flutuações de alturas hidrostáticas

foram identificadas como fator de geração de oscilações de circulação natural. Os resultados dos experimentos foram apresentados com gráficos de velocidade média na entrada em função da energia, de velocidade e pressão em função do tempo, de velocidade média na entrada em função da temperatura de sub-resfriamento na entrada, de velocidade média na entrada em função do aquecimento de entrada e do comprimento não-aquecido no riser, do período de oscilação em função do fluxo de calor e da velocidade média de entrada, da razão de velocidade e pressão em função da velocidade média de entrada, da pressão em função da razão de velocidade, da queda de pressão em função da energia cinética.

O diagrama simplificado do circuito experimental de remoção de calor residual por circulação natural apresentado na Figura 2.3, é composto por aquecedor, trocador de calor, perna quente e perna fria. Neste esquemático, o fenômeno de circulação natural ocorre com o surgimento de uma vazão de circulação natural no circuito primário, cujo percurso evolui a partir do aquecedor elétrico gerando potência térmica, produzindo calor que é cedido ao fluido primário. O fluido aquece e se expande, com conseqüente diminuição da sua densidade. Esta parcela de fluido primário de menor densidade ocupa a posição da parcela de fluido com maior densidade, com percurso iniciado no aquecedor, no plenum superior e perna quente, e ascendendo ao trocador de calor. No trocador de calor, o fluido primário aquecido trocará calor com o fluido do sistema de resfriamento secundário, sendo resfriado no escoamento descendente na tubulação no interior do trocador de calor. O fluido do circuito secundário é proveniente do sistema de abastecimento de água predial do laboratório. Com a troca de calor efetuada, o fluido primário tem sua densidade aumentada e escoar pela seção da perna fria, com a atuação da aceleração da gravidade no desnível entre o trocador de calor e aquecedor. No retorno ao aquecedor, o fluido desce pelo downcomer e entra no plenum inferior. De volta ao aquecedor, o fluido receberá novamente calor e iniciará novo ciclo. Os ciclos apresentarão este comportamento ao longo do tempo, proporcionando o arrefecimento da temperatura do fluido primário em regime estacionário.

Os métodos de escalonamento de sistemas de circulação natural monofásico e bifásico, foram aplicados por Vijayan et al. (2000), na simulação de escoamento

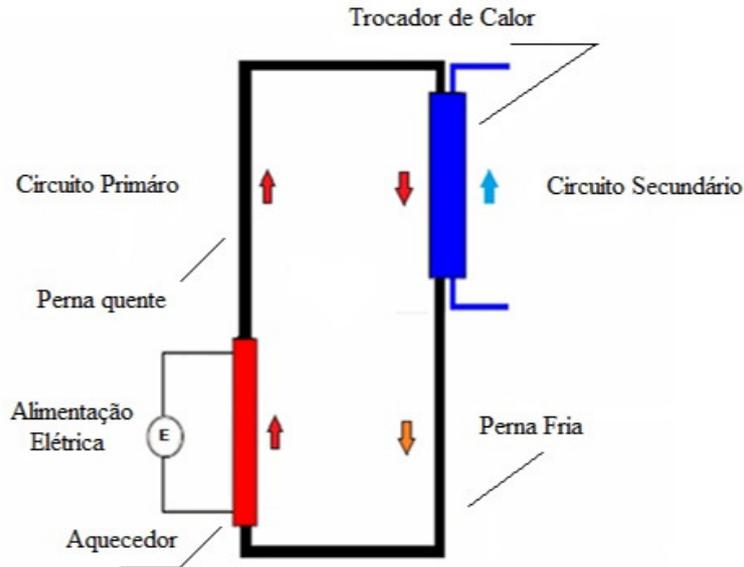


Figura 2.3: Fenômeno de Circulação Natural

monofásico em regime permanente com preservação de um parâmetro adimensional. A simulação para verificação de comportamento de sistemas bifásicos com diâmetro uniforme em regime permanente foi executada com apenas um parâmetro adimensional. A simulação de comportamento de estabilidade requerendo similaridade geométrica foi executada em adição à similaridade de parâmetros físicos nas equações de governo. As leis de escalonamento foram utilizadas para teste com os dados experimentais de circulação natural monofásica.

Os trabalhos de investigação teórico-experimental de oscilações de onda de densidade em circulação natural, foram executados por Guanghai et al. (2002), quando foram observados os parâmetros de influência no fenômeno, tais como, vazão mássica, pressão, fluxo de calor, qualidade de saída da instalação. A circulação natural bifásica foi utilizada para predição de parâmetros adimensionais, como número de mudança de fase, número de sub-resfriamento, número de Froude, número de geometria e número de fricção. Além disso, foi executado o estudo de critérios de estabilidade e correlações com oscilações de onda de densidade. Os resultados dos experimentos foram apresentados com gráficos de período de oscilação, de energia, de qualidade do equilíbrio crítico de saída em função da pressão e vazão mássica, da

energia em função da temperatura de sub-resfriamento e vazão mássica, do período de oscilação em função da vazão mássica e temperatura de sub-resfriamento.

As considerações técnicas para gerações futuras de reatores LWR em comparação com os citados BWRs foram elaboradas como contribuição de Aritomi et al. (1992). Nestas considerações, foi apontada a instabilidade termo-hidráulica, como um fenômeno presente na partida de reatores nucleares, que dificulta a operação dos mesmos, devido ao aumento da potência de saída. Esta investigação experimental do fenômeno, tanto em condições normais, quanto em condição anormal de partida, possibilitou a identificação de três espécies de instabilidades, dependendo da configuração do reator BWR. Identificaram a ocorrência de geysering provocado pela condensação e circulação natural provocada por flutuações de alturas hidrostáticas e a onda de densidade. Os resultados foram apresentados, envolvendo a partida do reator, comportamentos termo-hidráulicos envolvidos e circulação natural térmica. Os resultados dos experimentos foram apresentados através de diversos gráficos, de velocidade na entrada em função do fluxo de calor e do tempo, da pressão em função do tempo, do período de oscilação e queda de pressão em função do fluxo de calor, da velocidade média na entrada em função do fluxo de calor, do fluxo de calor em função do coeficiente de restrição, do período de geysering em função do tempo de retardo de ebulição, dos períodos de desenvolvimento da circulação natural em função da variação de potência.

Estudos de instabilidades termo-hidráulicas, que podem surgir no início da circulação natural de reatores BWR, foram estudados por Chiang et al. (1994), com o intuito de identificar seus mecanismos de condução e definição de métodos preventivos para procedimentos de partida e configurações de reatores. Abordaram também a formação de geysering e oscilações de circulação natural, além de considerações a respeito do papel da pressão do sistema nos experimentos, com comparações entre combustíveis. Apresentaram resultados dos experimentos com gráficos de qualidade de equilíbrio e fluxo reverso em função da velocidade na entrada, velocidade na entrada em função do fluxo de calor, período em função do retardo de tempo, velocidade média na entrada em função do fluxo de calor, energia cinética em função da pressão, período em função da velocidade média de entrada, fluxo de

calor em função da pressão do sistema, todos experimentos em função de variações de pressões e temperaturas.

Um estudo experimental de partida de reator nuclear em circulação natural de 5 MW à baixa temperatura, com teste executado no loop HRTL-5 em substituição ao loop e a geometria do reator de 5 MW, foi apresentado por Jiang et al. (1995) que verificou o comportamento de vários tipos de instabilidades de escoamentos bifásicos e os mecanismos mais importantes geradores dos mesmos, principalmente em relação às condições de partida e operação em ebulição. Além de discussões das influências de condições de pressão, foi estudado a ebulição e regime de escoamento, tanto em regime contínuo quanto transitório e as relações entre estabilidade e parâmetros termo-hidráulicos. Os resultados dos experimentos puderam ser observados através de gráficos de pressão versus tempo, de temperatura versus fluxo de calor, de energia versus tempo e de vazão mássica versus tempo.

A eficiência da água supercrítica no resfriamento de reatores nucleares, foi investigada por Sharma et al. (2010), que identificou alta eficiência térmica para a planta, além de observação de instabilidades provocadas pela alteração da densidade em maior escala, quando utilizado este tipo de fluido. A investigação utilizou códigos computacionais e equações de conservação linearizadas. O comportamento deste sistema foi analisado no loop de circulação natural à água supercrítica, além de observação da estabilidade em relação ao diâmetro, e demais situações como altura, entrada do aquecedor, temperatura, pressão, coeficiente de perda local. As comparações dos dados foram executadas com a base em dados reais.

Um estudo experimental com o objetivo de estudar o comportamento da circulação natural monofásica em loops, foi elaborado por Misale e Frogheri (2001), utilizando um loop denominado MTT 1 e outro LOOP 1, verificando a variação de temperatura e pressão ao longo de diversos diâmetros e geometrias, mantendo a mesma relação entre comprimento e diâmetro e variando a fonte de potência de 500 a 3.400 W. O loop MTT 1 apresentou comportamento instável. Para estabilização do comportamento do loop foram incluídos orifícios nas pernas verticais, com o intuito de controlar a pressão e, indiretamente, a perda de carga.

Estudo teórico-experimental, em loops de circulação natural monofásico com

diâmetros não-uniformes, foi apresentado por Vijayan (2002), para a observação da influência dos número de Reynolds e de Grashof, além da vazão mássica. Os experimentos levaram em conta escoamentos laminares e turbulentos. As comparações de correlações com dados experimentais apresentaram desempenho satisfatório. As conclusões foram elaboradas em relação à eficiência do método, para investigações experimentais de escoamentos de circulação natural em regime contínuo, a partir do emprego de modelos utilizando parâmetros adimensionais. Os resultados dos experimentos foram apresentados com gráficos de Número de Reynolds em função do Número de Grashof e Número de Reynolds em função do Número de Stanton.

Um estudo experimental a respeito de fenômenos de transporte geradores das instabilidades termo-hidráulicas, que encontram-se presentes na circulação natural de reatores BWR, foram estudados por Subkii et al. (2003), principalmente na partida dos mesmos e quanto às dificuldades de operação. A pesquisa foi desenvolvida em loop experimental de circulação natural com dois canais paralelos e montagem de tanque de expansão. A elaboração de mapas de estabilidade termo-hidráulica, para procedimento de partida de reatores, de modo a prevenir os efeitos destas instabilidades, foi o principal objetivo do experimento. O estudo envolveu escoamentos monofásicos, ocorrência de geysering, oscilações por flutuações de altura hidrostáticas, oscilação de onda de densidade, oscilações transitórias, estabilidade de escoamentos bifásicos. Os resultados dos experimentos foram apresentados com gráficos de vazão média no canal em função do fluxo de calor, de velocidade e pressão em função do tempo, de escoamento bifásico estável e semi-estável, de velocidade no canal em função do tempo, de velocidade reversa em função da velocidade média no canal, do período de oscilação em função do fluxo de calor, da flutuação de queda de pressão em função da velocidade média de entrada e da flutuação de alturas hidrostáticas em função da energia cinética.

Os circuitos de circulação natural, sem a utilização de máquinas motrizes para transporte de calor, de uma dada fonte de energia térmica até um trocador de calor, foram estudados por Vijayan (2005), que apresentou os princípios básicos de circulação natural, citou vantagens na sua aplicação na área nuclear e industrial. Além disso, comentou que este é um grande desafio para aceitação da circulação

natural, como forma normal da circulação de refrigerante (resfriamento) em reatores nucleares, mencionando ainda a classificação de sistemas de circulação natural e terminologias mais utilizadas.

Um trabalho similar foi executado por Yun et al. (2005), o qual investigou a instabilidade da circulação natural com escoamento monofásico e bifásico, nos loops do CARR (China Advanced Research Reactor), em condições de baixa pressão e baixa densidade de potência. O trabalho empregou ainda, modelo de análise de instabilidade para este loop, a partir do modelo homogêneo de equações. As oscilações de ondas de densidade, as variações de vazão mássica, as quedas de pressões e definição de condições de contorno próprias para condição de ebulição foram temas de observações nos experimentos.

Os códigos computacionais TRAC-PF1 e RELAP 5/2A foram utilizados para observação do comportamento do fenômeno de circulação natural em escoamentos monofásico e bifásico, em estudo executado por Andrade et al. (2005), que obteve curvas de temperatura em função do tempo, as quais foram construídas a partir de medições efetuadas através de termopares, aplicados diretamente no fluido e nas paredes das tubulações. As simulações foram executadas no loop de circulação natural da USP, para identificação da frequência e amplitude das oscilações de temperatura, com o intuito de formulação de modelo numérico para condição de escoamento bifásico em circulação natural.

As técnicas de análise de ruídos com base nas considerações teóricas para determinação dos transitórios, foram apresentadas por Manera et al. (2005), as quais envolveram oscilações de escoamentos monofásicos em circulação natural, com utilização de correlações cruzadas, sob condição de vazão com amplitude constante, e utilização de resfriamento através de fase gasosa na realização do experimento. O experimento foi realizado sob condição de escoamento bifásico, identificando a dependência da oscilação de velocidade em relação ao espaço, o que permitiu estabelecer uma relação entre os transitórios e os períodos de oscilação, durante a ocorrência das instabilidades de ondas de densidade.

Em continuação a esta linha de pesquisa, outro trabalho foi elaborado por Vijayan (2007), que apresentou uma análise de vários tipos de instabilidades monofási-

cas e bifásicas, ocorridas em circulação natural, realçando maiores instabilidades na circulação natural, em relação à circulação forçada, levando em consideração os escoamentos bifásicos. Os tipos de perturbações estáveis, neutramente estáveis e instáveis, que ocorrem em sistemas termo-hidráulicos foram identificadas através dos experimentos. Os resultados dos experimentos tais como, vazão mássica, queda de pressão, Número de Grashof, Número de Stanton e temperatura em função do tempo foram apresentados através de gráficos. A importância do surgimento de ciclo limite a partir de crescimento oscilatório máximo foi citado no trabalho. As desvantagens das instabilidades com surgimento de vibrações mecânicas, oscilações de vazões, queda de pressão, fluxo de calor crítico e oscilações de potência, também foram mencionadas. A influência da geometria da instalação dos loops tipo U, tipo oito e tipo retangular foram citados, além dos respectivos fenômenos secundários induzidos. Acrescentou ao trabalho informações, quanto à instabilidade de Ledinegg e o fluxo de calor crítico. As propagações de ondas acústicas e ondas de densidade, instabilidades estáticas e dinâmicas, direções de escoamentos e estudo pormenorizado sobre canais paralelos, também foram alvo do estudo.

Outro estudo comparativo teórico e experimental executado por Sabundjian et al. (2008), teve como objetivo a análise de fenômeno de circulação natural monofásica e bifásica, para utilização em remoção de calor residual em reatores nucleares, empregando variação na potência do aquecedor e na vazão de água de resfriamento do sistema secundário. Os resultados foram utilizados para validação de modelo computacional RELAP 5 / Mod. 3.2, para análise termo-hidráulica do circuito. Os gráficos mostraram a evolução de temperatura nos pontos de medição por termopares, vazão mássica do sistema primário, vazão mássica na linha de surto, considerando escoamento monofásico e bifásico, em função do tempo. A evolução de fração de vazio na saída do aquecedor e no tanque de expansão, considerando escoamento bifásico, foi analisada em função do tempo, utilizando RELAP 5.

As características de estabilidade em experimento de circulação natural à baixa pressão em instalação LPITF (Low Pressure Integral Test Facility), foram verificadas por He e Edwards (2008), que desenvolveu um modelo analítico para execução de investigação das características de estabilidade, utilizando técnicas de sistema de con-

trole, na análise de estabilidade linear por Diagrama de Nyquist, com identificação de margem de estabilidade, das instabilidades ocorridas em escoamento bifásico, com a introdução de pequena perturbação de velocidade na entrada do núcleo e de realimentação por perturbação de pressão, na região de escoamento bifásico.

Um estudo comparativo teórico e experimental foi executado por Sabundjian et al. (2009), para análise do fenômeno de circulação natural monofásica e bifásica, para utilização na validação de modelo computacional RELAP 5, em prosseguimento ao projeto de pesquisa em circulação natural. O trabalho permitiu a visualização dos resultados dos experimentos através de gráficos de evolução de temperatura na saída do aquecedor, saída do trocador de calor e saída do resfriamento secundário, considerando escoamentos monofásico e bifásico, em função do tempo, além de vazão mássica do sistema primário e fração de vazio, considerando escoamento bifásico, em função do tempo, utilizando RELAP 5.

2.3 Modelagem Analítica da Circulação Natural

A circulação natural modelada a partir de modelos existentes tem sua representação na forma unidimensional, onde a temperatura e velocidade do fluido são considerados uniformes no percurso hidráulico, considerando-se uma área transversal ao sentido do escoamento. Utiliza-se a Aproximação de Boussinesq para relacionamento de densidade e força de empuxo e temperatura.

Um estudo teórico com validação experimental para diversos loops, foi apresentado por Gartia et al. (2006), levando em consideração o escoamento em circulação natural bifásica em regime permanente, empregando as equações constitutivas e considerando o modelo de equilíbrio homogêneo, para obtenção de parâmetros adimensionais. Os resultados dos experimentos foram apresentados através de gráficos de vazão mássica em função da potência, vazão no núcleo em função de regime de escoamento, fração de vazio em função de qualidade, vazão em função de regime de escoamento e vazão em função da potência.

2.3.1 Conservação da Quantidade de Movimento

Utilizada para relacionamento entre vazão e pressão.

$$\rho_o \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial s} - \rho_g \hat{e}_z \cdot \hat{e}_s - F_s \quad (2.42)$$

2.3.2 Conservação de Energia

Utilizada para relacionamento entre temperatura e taxa linear de calor.

$$\rho C_p A \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial s} \right) = q' \quad (2.43)$$

No núcleo do reator,

$$q' = \frac{Q}{L_c} \quad (2.44)$$

No trocador de calor,

$$q' = \pi Dh(T - T_s) \quad (2.45)$$

Nas tubulações,

$$q' = 0 \quad (2.46)$$

2.3.3 Equação de Estado

Utilizada para relacionamento entre temperatura e densidade.

$$\rho = \rho_o [1 - \beta(T - T_o)] \quad (2.47)$$

2.3.4 Integração da Equação da Quantidade de Movimento

Utilizada para complemento de equações que envolvam, simultaneamente, velocidade, temperatura, densidade e pressão.

$$a \frac{d\dot{m}}{dt} = \beta \rho_o g \oint T dz - \frac{1}{2} \frac{K_1}{A^2} \frac{\dot{m}^2}{\rho_o} \quad (2.48)$$

$$a = \oint \frac{dS}{A(S)} \quad (2.49)$$

$$\frac{K_1}{A^2} = \sum_i f_i \frac{L_i}{D_i A_i^2} + \sum_j \frac{K_j}{A_j^2} \quad (2.50)$$

2.3.5 Escoamentos Estacionários

Utilização das equações para análise da circulação natural em casos de baixa vazão, envolvendo temperatura, fluxo de calor e diferenças de elevações.

$$\dot{m}C_p \frac{dT}{ds} = q' \quad (2.51)$$

$$\frac{1}{2} \frac{K_1}{A^2} \frac{\dot{m}^2}{\rho_o} = \beta \rho_o g \oint T dz \quad (2.52)$$

Utilização da equação para análise do perfil axial de temperatura.

$$T(s) = T_1 + \frac{Q}{\dot{m}C_p} \frac{s}{L_c} \quad (2.53)$$

$$T(s) = T_s + (T_2 - T_s) \exp\left(\frac{-h\pi Ds}{\dot{m}C_p}\right) \quad (2.54)$$

$$\oint T dz = (T_2 - T_1) \Delta l = \frac{Q \Delta l}{\dot{m}C_p} \quad (2.55)$$

Utilização da equação para análise preliminar de retirada de calor residual.

$$\Delta l = \Delta L + L' \quad (2.56)$$

$$L' = L \left[\frac{LHR/L}{1 - \exp\left(-\frac{LHR}{L}\right)} - 1 \right] \quad (2.57)$$

$$L = \frac{\dot{m}C_p}{\pi D_h} \quad (2.58)$$

$$\dot{m}^3 = \frac{2\rho_o^2 g \beta \Delta l Q}{(K_1/A^2) C_p} \quad (2.59)$$

$$T_2 - T_1 = \left(\frac{Q}{C_p} \right)^{2/3} \left(\frac{K_1/A^2}{2\rho_o^2 g \beta \Delta l} \right)^{1/3} \quad (2.60)$$

2.4 Circulação Natural Bifásica

Um trabalho de investigação experimental de circulação natural e no final de linha de escoamento foi apresentado por Hsu et al. (1998), no qual grandes amplitudes de oscilações de escoamento foram observadas, também influenciadas pelo desnível entre pernas quente e fria. Este trabalho levou em conta a ocorrência de pequena interrupção por acidente com perda de refrigerante em reator LWR (Light Water Reactor), um tipo de reator térmico, que utiliza a água leve como combustível e moderador de neutron. Para execução do experimento foi construído um loop experimental tipo U, com base nos conceitos de critérios de escala, para estudo de circulação natural bifásica. Além disso, foram utilizados fluidos como água e nitrogênio, para melhor separação dos fenômenos hidrodinâmicos daqueles de origem térmica. Este experimento serviu para observar, principalmente, a importância de parâmetros de resistência friccional, curvatura do loop U, centro térmico, geometria da entrada, que mostraram grande influência na obtenção de resultados. As medidas de distribuição de vazão na perna quente, regime de escoamento, taxa de circulação natural, foram obtidas com os experimentos realizados sob várias condições de teste. Os resultados mostraram-se importantes para extrapolação dos mesmos para instalações reais. Os resultados dos experimentos puderam ser visualizados nos gráficos de velocidade superficial do líquido versus velocidade superficial de gás (variação de abertura de válvula), de amplitude de oscilação de vazão versus velocidade superficial de entrada do gás, de período de oscilação versus velocidade superficial do gás (perna quente), de fração de vazão teórica versus fração de vazão experimental e de coeficiente de fricção versus velocidade superficial do líquido.

Uma investigação de instabilidade termo-hidráulica de um loop de circulação natural com escoamento bifásico, foi apresentado por Ishii et al. (1998) a partir da utilização de um método experimental denominado Método Taguchi, que utiliza ferramenta estatística para simulação do experimento. Os dados conclusivos form

apresentados numa faixa experimental, considerando a temperatura de entrada, a energia de aquecimento e canal de by-pass não aquecido, bem como principais fatores atuantes na instabilidade do loop. Além disso, executou experiências com redução de temperatura de entrada, da carga térmica, desconexão do by-pass com diminuição de restrições de escoamento bifásico ou qualquer outro fator que pudesse provocar situações de instabilidade.

Um estudo experimental de circulação natural bifásica foi apresentado por Tanimoto et al. (1998), em loop experimental com gás refrigerante Freon 113, abordando a influência do percentual de gás, através da fração de vazio, do comportamento do escoamento por erupção abrupta (flash) dos fenômenos de ebulição. Além da influência do controle de vazão por abertura de válvula, com as consequências dos fenômenos transitórios, da potência de entrada, coeficientes de fricção, além das temperaturas envolvidas e influência do resfriamento secundário. Os resultados dos experimentos foram visualizados com gráficos de fração de vazio versus tempo, vazão volumétrica versus tempo, pressão versus tempo, período de oscilação versus abertura de válvula, pico de vazão volumétrica versus abertura de válvula, duração da erupção abrupta versus abertura de válvula, excursão de escoamento versus abertura de válvula, nível de líquido no condensador versus abertura de válvula, pico de fração de vazio no riser versus seção transversal do riser. Outras verificações foram feitas em relação à temperatura de sub-resfriamento, aquecimento do riser e resfriamento secundário.

Os estudos teóricos foram comparados para investigação de características da circulação natural bifásica baseadas no modelo drift-flux com outras equações adimensionais, foram elaborados por Jeng e Pan (1999), gerando o desenvolvimento de trabalhos experimentais, onde nas pesquisas pertinentes foram obtidas informações importantes, em relação aos efeitos das alterações pela utilização na análise de modelos similares.

Estudo teórico de investigação em loop semi-fechado de circulação natural bifásica de instabilidades de escoamento, foi executado por Lee e Kim (1999), utilizando método de análise de estabilidade linear com perturbações e modelo homogêneo bifásico, para a verificação da influência do tanque de expansão no comporta-

mento instável do sistema. Os resultados das simulações foram apresentados com gráficos de velocidade do líquido em função do fluxo de calor e da temperatura de sub-resfriamento de entrada.

Uma revisão bibliográfica e resumo do estado da arte foi executado por Nayak e Vijayan (2008), que apresentou a ebulição de sistema de circulação natural bifásica, aplicado em projeto e desenvolvimento de reatores avançados, com base no estudo de instabilidades de escoamentos e seus diversos tipos, comparado a sistemas de circulação forçada, além da conceituação dos mecanismos de instabilidades na circulação natural bifásica e influências da geometria. Apresentaram resultados dos experimentos com gráficos de queda de pressão em função da vazão mássica e do tempo, número de mudança de fase em função do número de sub-resfriamento, temperatura e fluxo de calor crítico em função do tempo, fração de vazio em função da qualidade e do tempo, potência em função da temperatura de sub-resfriamento e da temperatura na entrada do núcleo, fluxo de calor em função da temperatura, potência em função da pressão, temperatura de sub-resfriamento em função de potência, potência no canal em função da temperatura de sub-resfriamento na entrada.

Estudo experimental para identificação de instabilidade bifásica em circulação natural, sob condições de movimento de rotação, foi executado por Tan et al. (2009), que também analisou as instabilidades bifásicas oriundas de induções de flutuações de escoamento de fluidos. Verificou que estes tipos de instabilidades são inversamente proporcionais ao efeito não linear da amplitude e frequência do movimento de rotação. Além disso, identificou a influência da oscilação da onda de densidade na flutuação do resfriamento do sistema. As oscilações de escoamentos complexos regulares e irregulares e suas transições em sistemas termo-hidráulicos foram apresentadas, além dos limites de estabilidade marginais. Os resultados dos experimentos foram apresentados com gráficos de vazão mássica, com e sem oscilação e, também flutuação, além de escoamentos complexos e velocidade, todos em função do tempo. Os gráficos de potência em função da temperatura, de número de sub-resfriamento em função do número de mudança de fase, oscilação de escoamento complexo em função de oscilação de onda de densidade também foram apresentados.

Uma investigação experimental em circuito fechado de sistema de circulação

natural com escoamento bifásico, e utilizado em sistemas de remoção de calor de emergência, foi executada por Santini et al. (2010), com base em soluções de dispositivos de engenharia de segurança de reatores nucleares avançados (Reator IRIS). Uma instalação experimental foi construída para simulação e operada nos laboratórios SIET (Itália) para estudo de circulação natural, de variação de pressão, de circuito com aquecimento elétrico, de gerador de vapor com serpentina helicoidal como fonte de calor e condensador de piscina com tubo horizontal como trocador de calor. A análise foi executada em regime permanente para caracterização do comportamento do sistema e dos parâmetros principais. As oscilações de temperatura, de escoamento e de pressão estiveram presentes devido ao volume limitado do circuito.

2.4.1 Leis Bifásicas de Similaridades

Utilização das equações de continuidade da mistura, continuidade para o vapor, quantidade de movimento para a mistura, energia para a mistura, energia para o sólido e condições de contorno de temperatura.

Velocidade Drift-flux entre vapor e líquido

$$V_{gj} = (1 - \alpha)(u_g - u_f) = u_g - j \quad (2.61)$$

Fluxo total

$$j = (1 - \alpha)u_f + \alpha u_g \quad (2.62)$$

$$\rho j = \rho u + \alpha \Delta \rho V_{gj} \quad (2.63)$$

$$\rho_f u_o = \rho u = \rho_g u_g \alpha / x \quad (2.64)$$

$$j = (1 + x \Delta \rho / \rho_g) u_o \quad (2.65)$$

Número de Drift-Flux

$$N_d = (V_{gj}/u_o) = (x\Delta\rho/\rho_g) [(\rho_f/\alpha\Delta\rho) - 1] - 1 \quad (2.66)$$

Comprimento de não-ebulição

$$l_{nb} = \frac{\Delta h_{sub}\rho_f u_o d_{ho}}{4q_o} \quad (2.67)$$

Geração de calor no sólido

$$q''_o = \delta q_{so} \quad (2.68)$$

Título de vapor na saída da seção de aquecimento

$$x_e = \frac{4q_o l_o}{\rho_f u_o \Delta h_{fg} d_{ho}} - \frac{\Delta h_{sub}}{\Delta h_{fg}} \quad (2.69)$$

Força de impulsão gravitacional

$$\Delta p_{dr} = \beta g \rho_f \Delta T \left(\frac{l_{nb}}{2} + \frac{l_{nc}}{2} \right) + \sum_{TP} (\Delta \rho g < a > l') \quad (2.70)$$

Resistência ao escoamento

$$\Delta p_{fr} = \frac{\rho_f u^2}{2} \left[\sum_{SP} \left(\frac{fl}{d_h} + K \right)_i (a_o/a_i^2) + \sum_{TP} \left(\frac{fl}{d_h} \right)_i \left[\frac{1+x\Delta\rho/\rho_g}{(1+x\Delta\mu/\mu_g)^{0,25}} \right]_i \right. \\ \left. (a_o/a_i)^2 + \sum_{TP} K_i [1 + x^{3/2} (\Delta\rho/\rho_g)]_i (a_o/a_i)^2 \right] \quad (2.71)$$

2.5 Escalonamento e Similaridade

Uma proposta para elaboração de critérios de escalonamento de instalações experimentais foi apresentada por Ishii e Kataoka (1984), a partir das equações de

governo, escalonamento integral, escalonamento do volume de controle e escalonamento de fenômenos locais, leis de similaridades monofásicas. Estes critérios levaram em conta os parâmetros de similaridades e números adimensionais, as leis de similaridades bifásicas, além de utilização de grupos de similaridades e análise de perturbações e modelo de equação drift-flux.

No projeto e construção do Circuito de Circulação Natural (CCN), conforme Figura 2.4, foi de vital importância a utilização de parâmetros de similaridade e escala para compatibilização do sistema passivo de remoção de calor residual em PWR de Baixa Energia.

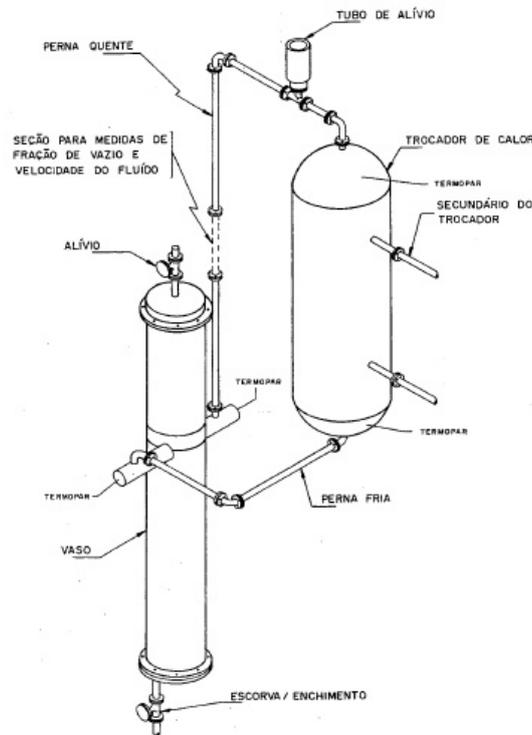


Figura 2.4: Circuito de Circulação Natural - CCN - Original

Os parâmetros de similaridades entre protótipo e CCN foram estabelecidos para condição de trabalho com pressão de 0,1013 MPa. A similaridade em escala de comprimento e altura é calculada pela Equação 2.72,

$$l_R = \left(\frac{a_t}{a_o} \right)_R^{1,555} \left(\frac{B\rho}{\mu} \right)_R^{0,222} \left(\frac{1}{a_o} \right)_R^{-0,667} \quad (2.72)$$

Considerando os dados do protótipo em relação a várias pressões, mais especi-

ficamente para 0,1013 MPa, tem-se

$$\left(\frac{B\rho}{\mu}\right)_R^{0,222} = 0,5 \quad (2.73)$$

Tomando-se,

$$\left(\frac{a_t}{a_o}\right)_R \cong 6,03 \quad (2.74)$$

A Equação 2.72, passa a ter nova forma

$$l_R = 8,17 \left(\frac{1}{a_{oR}}\right)^{-0,667} \quad (2.75)$$

Estabelecendo a relação entre as 38.280 barras de combustíveis do protótipo e 52 resistências do CCN, tem-se

$$\frac{1}{a_{oR}} = \frac{38280}{52} \quad (2.76)$$

Assim sendo, com a efetuação do cálculo, obtém-se

$$l_R = 0,1 \quad (2.77)$$

O Circuito de Circulação Natural foi dimensionado, de acordo com as escalas de altura e comprimento $l_R = 0,1$ e de potência $a_{oR} = 52/38280$. Quanto às tubulações a escala definida foi $a_t/a_{oR} = 6,03$.

Outros trabalhos utilizam ferramentas de simulação para elaboração de modelos e códigos computacionais, que são confrontados com a execução de experimentos, para a validação das proposições. Para elaboração de proposições quanto à segurança das instalações nucleares, vários experimentos foram realizados para a investigação do fenômeno de circulação natural, aplicável em sistema passivo de remoção de calor residual.

Os trabalhos experimentais em instalação com escala em volume foram elaborados por Kawanishi et al. (1991), de modo a identificar o comportamento em acidente por perda de refrigerante na perna fria de um PWR. Para simular a ocorrência de grande interrupção o calor de decaimento foi removido com a interrupção do escoamento. Para pequena interrupção utilizou-se o gerador de vapor, atuando

no comportamento termo-hidráulico na circulação natural e no resfriamento reverso da condensação. Contando ainda com a despressurização do sistema secundário para moderação do acidente e resfriamento do núcleo (reumidificação) descoberto pela selagem do loop na perna fria. A alteração da concentração do refrigerante não provocou efeitos no gerador de vapor, o que gerou a conclusão que gases do refrigerante para o vapor permanecem no gerador de vapor. Os resultados dos experimentos foram visualizados através de gráficos de pressão versus tempo pós-ruptura, de vazão versus tempo pós-ruptura (fração de vazio), de fração de vazio versus tempo pós-ruptura, de elevação versus tempo pós-ruptura, de temperatura versus tempo pós-ruptura, de interrupção de escoamento versus tempo pós-ruptura (qualidade), de vazão de circulação natural versus inventário de massa, de remoção de calor versus tempo pós-ruptura, de coeficiente de transferência de calor versus tempo pós-ruptura e de pressão versus tempo pós-ruptura.

A filosofia de escalonamento entre potência e volume para execução de simulação de circuitos de circulação natural, foi estudado por Nayak et al. (1998), através de investigação experimental e teórica para estudo de filosofia de escalonamento de adequada relação potência-volume para simulação de circulação natural e aplicação para projeto de instalações de teste (ITF-AHWR) para reatores de água pesada indiano. Os resultados obtidos mostram que a redução do diâmetro do canal (tubulação) de escoamento de uma instalação em escala potência-volume tem condições de afetar o comportamento da circulação natural do protótipo, devido às distorções em razão da incapacidade de simular a resistência de atrito da instalação em escala, o que implica dizer que o diâmetro das tubulações (canais) deve ser o mais próximo possível do real. Esta verificação foi baseada na comparação entre PHWR Indiano de 200 MWe e uma instalação em escala FISBE 1 com escalonamento potência-volume. Outras investigações com modelo matemático e código computacional, foram executadas com simulação em regime permanente e transitório para observação do comportamento de circulação natural do protótipo do reator.

Estudo de investigação experimental em loop semi-fechado de circulação natural bifásica de instabilidades de escoamento, foi executado por Kim e Lee (2000), que apresentaram variações de alturas de cotas do tanque de expansão e respectivas

resistências hidráulicas, com os experimentos realizados de seis diferentes modos, tais como, circulação natural monofásica, circulação natural bifásica periódica sem ebulição entre os ciclos, circulação bifásica contínua estável e três tipos de circulação natural bifásica com períodos cíclicos diferentes. Apresentaram resultados dos experimentos com gráficos de temperatura de sub-resfriamento na entrada em função do fluxo de calor, velocidade na entrada do aquecedor, pressão e temperatura na entrada e saída do aquecedor, fração de vazio no riser, velocidade no tanque de expansão em função do tempo, em circulação natural monofásica, circulação periódica, circulação contínua bifásica, com variações de energia e variações de fatores de restrição de escoamento na entrada e saída. Realização de análises nos experimentos, para observação da influência do tanque de expansão na estabilidade do regime de escoamento.

Um trabalho de investigação experimental de circulação natural na perna quente de um loop experimental tipo U de grande diâmetro interno, construído com base nos conceitos de critérios de escala, foi elaborado por Hibiki e Ishii (2000) e que procurou observar, principalmente, a importância de parâmetros, tais como a resistência friccional, o diâmetro da tubulação e o centro térmico, a partir de vários testes realizados nos experimentos em condição de circulação natural e circulação forçada, tendo como fluidos, nitrogênio e água, com o intuito de observar o comportamento da circulação natural bifásica e escoamentos, sob condições de acidente com pequena interrupção, com perda de refrigerante em instalação de reator LWR. Os resultados dos experimentos foram observados através de gráficos de velocidade superficial do líquido versus velocidade superficial de gás (variação na abertura de válvula), de amplitude de oscilação de vazão versus velocidade superficial de entrada do gás, de velocidade superficial de gás ao fim do escoamento versus nível d'água do tanque de expansão, da fração de vazio versus velocidade superficial de gás, da fração de vazio na transição bolhas-slug versus locação axial, de elevação versus velocidade superficial de entrada do gás, de velocidade de gás versus vazão volumétrica da mistura (variação de perda de carga), de parâmetro de distribuição versus velocidade superficial de gás, de velocidade drift versus velocidade superficial de gás (variação de padrões de escoamentos).

Um estudo teórico e experimental de remoção de calor passiva por circulação natural foi elaborado por Botelho et al. (2002), utilizando circuito termo-hidráulico de escala reduzida, através de análise de similaridade na observação de comportamento de temperaturas ao longo do circuito hidráulico, com escala de proporcionalidade para obter vários valores teóricos ao longo das excursões do fluido em escoamento monofásico e bifásico, empregando variáveis adimensionais e escalas geométricas adequadas.

Uma novo método de escalonamento foi proposto por Lapa et al. (2004), como alternativa aos critérios de Ishii, envolvendo utilização de sistema especialista denominado algoritmo genético, com aproximações a partir de equações e grupos adimensionais. A utilização de Número de Mach (velocidade) e equação de Navier-Stokes, também na forma adimensional, gerou o surgimento de relações entre as variáveis dimensionais e variáveis adimensionais. A introdução de função objetivo, relacionando as diferenças entre o real e o projetado, culminou com o desenvolvimento das equações por otimização computacional para obtenção de uma expressão geral, com o envolvimento de variáveis físicas.

Estudo sobre a instalação experimental IRIS, foi elaborado por Carelli et al. (2009), envolvendo utilização de Reator de Água Leve Avançado (ALWR), com escalonamento com base na teoria de análise de escala por hierarquia com duplo nó. A utilização de metodologia de análise de escala fracional, a partir da síntese dos dados experimentais para geração de critérios quantitativos. Quanto aos critérios de similaridade e de concentrações de volumes foram utilizados os grupos de escalas. Este é um método alternativo ao método clássico proposto por Ishii, para desenvolvimento de programa para avaliação de desempenho de modelos, consistindo de identificação de transientes, de geometrias, do comportamento das fases, da avaliação de incertezas e das distorções dos efeitos.

Um estudo de revisão bibliográfica foi elaborado por Lu et al. (2010), envolvendo o desenvolvimento de modelos matemáticos para obtenção de critérios de escala e similaridade, além de estudo dos fenômenos termo-hidráulicos e seus comportamentos em condição de circulação natural. As simplificações adotadas nas situações de transferências de calor foram apresentadas com a utilização de pro-

priedades de similaridades de escoamento e densidades. As distorções inerentes em relação à transferência de calor foram citadas, envolvendo diâmetro e espessura de parede de tubulação, bem como a ocorrência das instabilidades de escoamento e do fluxo de calor crítico.

Um estudo comparativo entre várias instalações escalonadas foi elaborado por Choi (2010), que executou análise de comportamento das interações complexas de sistemas de remoção de calor residual em reatores nucleares. Os resultados relativos à da instalação CAREM/ CAPCN foram apresentados através de gráficos de vazão e pressão em função do tempo, utilizando parâmetros de escala e máxima potência. O trabalho se estendeu na caracterização de componentes, balanço térmico, avaliação termo hidráulica e calibração de instrumentos. O código computacional RELAP 5/MOD3.3 foi utilizado para simulação do desempenho da instalação CAPCN. Na observação do comportamento da circulação natural na instalação integral AHWR ITL, os fenômenos de transporte foram analisados na remoção de calor residual. A investigação englobou o estudo do comportamento da circulação natural em diferentes situações de partida, operação normal, acidentes ou transientes das plantas nucleares.

2.6 Escoamentos Bifásicos

Akita e Yoshida (1974) executaram trabalho experimental para cálculo de área interfacial em coluna de bolhas, considerando tamanho de bolhas e velocidade de gás, correlações utilizadas de tamanho médio de bolhas, área interfacial e coeficiente de transferência de massa do líquido.

Análises de instabilidades hidrodinâmicas, referentes a escoamentos bifásicos, foram executadas por Fukuda e Kobori (1979), para classificação de oito tipos de instabilidades, sendo três, estáticas, chamadas de instabilidades de Ledinegg e cinco, dinâmicas, chamadas de instabilidades de onda de densidade. Particularmente, nesta análise, dois tipos foram observados para cada queda de pressão utilizada no experimento, a gravitacional e a friccional, em condições de escoamento bifásico. Apresentação dos resultados dos experimentos com circulação natural e forçada, incluíram

gráficos de escoamento em função da potência de aquecimento e do tempo, potência em função da temperatura na entrada e da temperatura de sub-resfriamento. Analisaram os dados experimentais para classificação de instabilidades e execução de cálculos de modelos teóricos.

Rouhani e Sohal (1983) apresentaram trabalho de revisão bibliográfica a respeito de padrões de escoamentos bifásicos, contemplando com detalhamento de regimes de escoamentos que são identificados em tubulações horizontais e verticais. Estes regimes surgem devido à presença de fase de vapor e de líquido nestes condutos sob diferentes formas. Este artigo permite uma revisão de padrões de escoamentos bifásicos.

Trabalhos de investigação teórico-experimental de instabilidades de escoamento bifásico em condições de baixa vazão, foram executados por Fukuda et al. (1984), que observaram as características do fenômeno e as relações entre período de oscilação e tempo de trânsito, citando a aplicação de modelo drift-flux e análise linear do escorregamento e seus efeitos, nestas condições. Os resultados serviram para comparação com outros trabalhos teóricos, dentro da linha de pesquisa. O refrigerante R 113, foi utilizado para verificação de estabilidade nas condições de contorno, supondo-se escoamento laminar e a atuação da gravidade como principal fator de desestabilização na seção aquecida e sua participação nas equações conservativas. Apresentaram resultados dos experimentos com gráficos de escorregamento em função do fator de fricção, vazão em função da potência, período de oscilação em função da potência, período de oscilação em função do tempo de trânsito.

Experimento para investigação de mecanismo de ebulição periódica ou erupção de gases em circuito bifásico fechado, utilizando tubo de vidro, foi elaborado por Kuncoro et al. (1995), que apresentaram preenchimento integral do volume do evaporador, com fluido refrigerante R 113 e água. Executaram as medições de temperatura e variações de pressões, quando da ocorrência de termosifão. Observaram diferenças de comportamento, com experimentos executados com água e R 113. Observaram que a utilização de água contribuiu para o surgimento de geysering. Com a utilização do refrigerante R 113 observaram que a expansão das bolhas e aumento de pressão proporcionaria também a formação de geysering. Apresentaram resultados dos ex-

perimentos com gráficos de pressão, temperatura e posições em função do tempo, temperatura versus pressão, temperatura versus fluxo de calor e variação de pressão, visualizações de padrões de escoamentos em função de variações de pressões.

Estudo experimental para identificação de onda de densidade, foi executado por Qiu et al. (2003), em condições de escoamento bifásico, na ebulição de sódio em percurso anular, com tipo de escoamentos de baixa qualidade, máximos e reversos. Apresentação de resultados através de gráficos de fluxo de calor inicial e período de oscilação em função da pressão e também em função da vazão mássica. Além de número adimensional experimental versus número adimensional teórico.

2.6.1 Escoamentos Bifásicos Verticais

A seguir tem-se a descrição de tipos de regimes de escoamentos bifásicos verticais, com as ilustrações mostradas na Figura 2.5.

O regime de escoamento tipo bolhas dispersas ocorre provocado pela velocidade moderada da fase de líquido, em relação ao menor volume da fase de vapor, provocando um escoamento da fase de vapor na forma de pequenas bolhas.

O tipo de regime de escoamento denominado bolha de Taylor apresenta interação da fase líquida de maior velocidade com a fase de vapor, que permanece com velocidade moderada, e deste modo ocorre a produção de bolhas de vapor contidas na fase líquida.

No regime de escoamento tipo pistonado aparece, devido ao aumento da velocidade da fase de vapor, a produção de bolhas de maiores tamanhos, a partir da entrada do canal de escoamento e com ocorrência de trem de bolhas regular.

O tipo agitado é um regime de escoamento no qual ocorrem, pelo aumento simultâneo das velocidades das fases de líquido e de vapor, a formação de mistura em forma de espuma, com a concentração da fase de vapor na região central do canal de escoamento e a camada de baixa espessura da fase de líquido na região da parede do canal de escoamento.

Este tipo de escoamento ocorre em razão da maior velocidade da fase de vapor, em relação à menor velocidade da fase de líquido, provocando o deslocamento da fase líquida para a região da parede do canal de escoamento, mantendo-se a fase de

vapor concentrada na zona central do canal de escoamento.

O tipo de regime de escoamento surge devido ao aumento da velocidade da fase de líquido, em relação à velocidade de gás, provocando a dispersão da fase de líquido na forma de pequenas bolhas. Um alta densidade da fase de vapor pode provocar o arraste da fase de líquido na forma de pequenas bolhas.

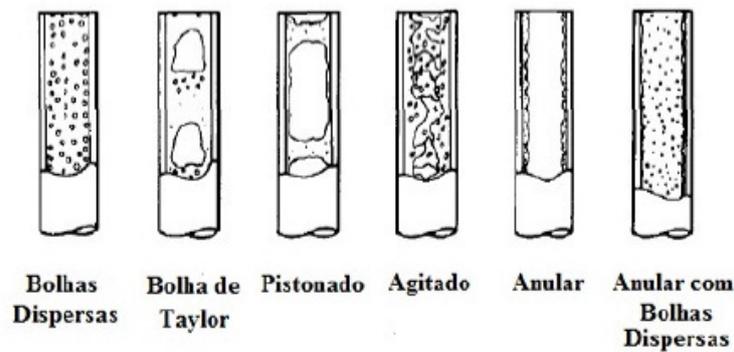


Figura 2.5: Escoamentos Verticais

2.6.2 Mapas de Escoamentos Bifásicos

Padrões de escoamentos foram citados por Rouhani e Sohal (1983), que através de ilustrações procuraram fazer as comparações de diversos mapas de regimes de escoamentos utilizados nas caracterizações de processos e sistemas a partir de dados experimentais.

A seguir tem-se a descrição de tipos de escoamentos bifásicos horizontais, com a ilustração mostrada na Figura 2.6, referente ao mapa de Ishii/Mishima e Dukler/Taitel, Rouhani e Sohal (1983).

Obtenção de dados importantes em experimentos com PWR, através da construção de mapas de escoamentos como elemento avaliador do desempenho ou comportamento da circulação natural, em termos de conceito de projeto destes reatores, foi elaborado por D'Auria e Frogheri (2000), que estudaram a remoção de calor residual, a partir da configuração geométrica, em relação a geradores de vapor com tubo U, em condições de escoamento bifásico no núcleo com baixa potência, em torno de aproximadamente vinte por cento da potência nominal, além de simular a operação

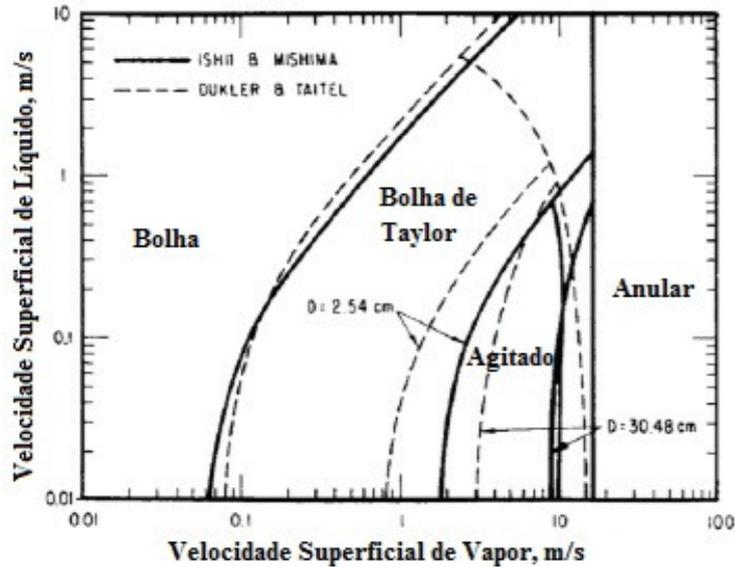


Figura 2.6: Mapa de Escoamentos Verticais Comparativos entre Ishii/Mishima e Dukler/Taitel - Fonte Rouhani e Sohal (1983)

do sistema bem próximo à condição nominal, sem comprometimento térmico.

Chen et al. (2006) realizaram experimentos para estudos de padrões de escoamentos a partir de sistema em ebulição, utilizando tubos de diâmetros internos de 1, 10, 2, 01, 2, 88 e 4, 26 mm. Apresentando uma seção de teste de resfriamento, uma seção de teste de aquecimento e outra seção de teste de observação dos fenômenos. Os escoamentos foram desenvolvidos em sentido vertical ascendente, utilizando como fluido de ensaio o refrigerante R 134 A. Os padrões de escoamentos identificados foram de bolhas dispersas, borbulhante, bolha confinada, slug, churn e anular. Os padrões de fluxo foram observados e gravados por uma câmera digital de alta velocidade do tipo Phantom V4 B/W, resolução de 512 x 512 pixels, com taxa de 1000 fps para máxima resolução até 32.000 fps com resolução reduzida.

Um trabalho sobre tipos de escoamentos foi elaborado por Faccini (2008), que abordou os escoamentos bifásicos e seus mapas de regimes de escoamentos e os escoamentos multifásicos, onde apresentou respectivos modelos físicos e parâmetros. Em continuação mencionou técnicas de medição aplicáveis, com relação à utilização de ultrassom para medição de vazão de líquido, para identificação de interface de

ar-líquido, utilizando sistema de controle por supervisorio e rede Field-bus.

2.6.3 Parâmetros de Escoamentos Bifásicos

Fração de Vazio de Vapor

$$\alpha = \frac{A_G}{A_T} \quad (2.78)$$

Fração de Vazio de Líquido - Hold-up

$$1 - \alpha = \frac{A_L}{A_T} \quad (2.79)$$

Velocidade Superficial de Vapor

A velocidade superficial de vapor é definida considerando-se apenas a existência da vazão de vapor atravessando a seção transversal do tubo.

$$u_{G_S} = \frac{Q_{G_S}}{A_T} \quad (2.80)$$

Velocidade Superficial de Líquido

A velocidade superficial de líquido é definida considerando-se apenas a existência da vazão de líquido atravessando a seção transversal do tubo.

$$u_{L_S} = \frac{Q_{L_S}}{A_T} \quad (2.81)$$

Velocidade de Vapor

A velocidade de fase de vapor é definida considerando-se que a fase de vapor escoando com determinada vazão, ocupando uma parcela da área da seção transversal do tubo.

$$u_G = \frac{u_{G_S}}{\alpha} \quad (2.82)$$

Velocidade de Líquido

A velocidade de fase de líquido é definida considerando-se que a fase de líquido esteja escoando com determinada vazão, ocupando uma outra parcela da área da seção transversal do tubo.

$$u_L = \frac{u_{LS}}{1 - \alpha} \quad (2.83)$$

Fração Volumétrica de Vapor

$$\beta = \frac{Q_G}{Q_T} \quad (2.84)$$

Fração Volumétrica de Líquido

$$1 - \beta = \frac{Q_L}{Q_T} \quad (2.85)$$

Taitel et al. (1980) definiu correlação para cálculo de velocidade superficial de líquido em transição bolhas dispersas-bolhas de Taylor, no processo de aglomeração e coalescência de bolhas, em função do aumento da vazão e aumento da fração de vazão de vapor.

$$U_{sL} = \frac{1 - \alpha_V}{\alpha_V} U_{sV} - (1 - \alpha_V) U_o \quad (2.86)$$

2.6.4 Velocidade da Mistura

A velocidade da mistura é a velocidade resultante da soma das velocidades superficiais das fases de líquido e de vapor, quando as fases estão no mesmo sentido do escoamento, denominado sentido co-corrente.

$$U_m = V_{sV} + U_{sL} \quad (2.87)$$

Considerando-se velocidades das fases em sentido contrário tem-se, ou contra-corrente, a velocidade da mistura é a diferença entre as velocidades superficiais das fases.

$$U_m = U_{sV} - U_{sL} \quad (2.88)$$

2.6.5 Velocidade Drift-flux

A velocidade Drift-flux ou velocidade relativa é a velocidade resultante da diferença entre as velocidades das fases de líquido e de vapor, quando as fases estão no mesmo sentido do escoamento, denominado sentido co-corrente, .

$$U_d = U_V - U_L \quad (2.89)$$

Considerando-se velocidades das fases em sentido contrário, tem-se

$$U_d = U_V + U_L \quad (2.90)$$

Outra correlação foi deduzida por Harmath (1960) para velocidade de bolha,

$$U_b = 1,53 \left[\frac{g(\rho_L - \rho_V) \sigma}{\rho_L^2} \right]^{1/4} \quad (2.91)$$

2.7 Experimentos com Investigação de Frações de Vazios, Comprimentos de Bolhas, Velocidades de Bolhas e Perfis de Bolhas

Um trabalho sobre princípios de medições utilizados para estudos de verificação de estrutura de turbulência de escoamentos borbulhantes ar-água foi elaborado por Serizawa et al. (1975). Este trabalho destacou a importância da fração de vazio como parâmetro mais importante na engenharia. A pesquisa explorou a medição de perfis de velocidades das fases e perfis de frações de vazio locais. Além da obtenção de frações de vazios locais, foram estudadas as taxas de impacto de bolhas, velocidades de bolhas e espectros de bolhas. Os princípios de medições foram empregados com técnicas de correlações cruzadas e apresentação de histogramas de velocidades de bolhas. As velocidade de bolhas foram medidas por técnica de multi-canal. A

velocidade de líquido e difusão de calor foram também estudados, além das medições de dispersões de bolhas.

Estudos de escoamentos bifásicos foram executados por Barnea e Shemer (1989), que utilizou sonda de condutividade para detecção de frações de vazios. Este procedimento foi empregado para os estudos de escoamentos verticais ascendentes do tipo ar-líquido, com detecção de fração de vazio no eixo central de tubulação vertical. As transições ocorridas entre os padrões de escoamentos foram estudadas para diversos valores. Os dados foram obtidos e processados, gerando a elaboração de histogramas. Os dados resultantes do processamento foram utilizados para reconhecimento de padrões, cálculo de fração de líquido para escoamento tipo Bolha de Taylor e tipo pistonado. As conclusões sobre o trabalho geraram informações relevantes ao tema do estudo.

Para estudos de variações de padrões de escoamento bifásico, Hsieh et al. (1997) utilizaram técnicas de processamento de imagens dinâmicas na região do riser, acima da seção aquecida, para interação com o comportamento termo-hidráulico de um loop de circulação natural, com o intuito de definir quatro modos de escoamentos: permanente, periódico com média amplitude, periódico com grande amplitude e caótico. Estudaram o escoamento monofásico com média amplitude e vazão de bolhas com pequena fração de vazio, utilizando o riser inferior. Os experimentos foram realizados em conjunto com outros dois padrões e com a variação das frações de vazio. O método Taguchi foi aplicado para investigação de vazões e propriedades termo-hidráulicas.

Thorncroft et al. (1998) realizaram estudo de investigação de movimento de bolhas, utilizando câmera de alta velocidade, em condições de movimentos ascendentes e descendentes, através de aquisição e processamento de imagem. Com isso, foram elaborados os gráficos de transferência de calor em função da diferença de temperatura na parede, de diâmetro de bolha em função da taxa de crescimento de bolhas, de diâmetro de bolha em função do tempo, além de probabilidades de diâmetros de bolhas no início da subida ou descida.

Um trabalho sobre método de medição instantânea de perfis de sinal de eco ultrassônico, ao longo do campo ultrassônico, foi elaborado por Wada et al. (2006),

aplicados a escoamentos bifásicos do tipo ar-água, com aplicação de padrão de reconhecimento específico para este tipo de escoamento. Os gráficos de pressão do som e do ângulo de incidência foram apresentados, juntamente com os gráficos de velocidade de líquido e velocidade de vapor, utilizados para definição dos padrões de escoamento. A Função Densidade de Probabilidade foi apresentada em função do diâmetro médio de bolhas, a partir de informações obtidas com a aplicação da técnica de aquisição e processamento de imagem. Os sinais de eco refletidos foram medidos em função do tempo, cujas aquisições permitiram construir os gráficos de atenuação de sinal versus relação raio-diâmetro, e da atenuação integral de eco de fundo em função do tempo.

Um estudo experimental pioneiro de reconstrução tridimensional de escoamentos verticais intermitentes e estacionários, foi elaborado por Manera et al. (2006), que utilizou sensores do tipo wire-mesh para as medições de frações de vazio. Estas medições apresentaram resultados de distribuições de frações de vazio em duas dimensões, com os sensores instalados na seção transversal da tubulação. As aquisições de sinais dos sensores permitiram a medição das velocidades das bolhas de vapor que foram identificadas na passagem pelos sensores. O método utilizado para medir as velocidades de bolhas baseou-se no espaçamento dos sensores a pequena distância do eixo de referência. As aquisições de sinais foram processadas por correlação cruzada. Com a obtenção dos tempos de trânsito das bolhas de vapor atravessando os sensores, e utilizando um modelo por diferenças, foi possível estimar os valores das velocidades das bolhas, em função dos espaçamentos conhecidos. As velocidades e comprimentos de bolhas foram determinados por comparações de métodos. Os perfis de frações de vazios foram correlacionados aos tamanhos de bolhas.

Um trabalho experimental em continuação à pesquisa de investigação de escoamento induzido por cadeia de bolhas em ascensão foi elaborado por Liu e Zheng (2006), que executou comparações entre o valor calculado na aplicação de processamento de imagem para velocidades de bolhas na cadeia com valores previstos pelo cálculo analítico, e a elaboração das correlações a partir da comparação entre os procedimentos empregados nas análises.

2.8 Princípios de Ondas Ultrassônicas

Todo material em condição de desequilíbrio sem estar sob a ação de cargas externas, contem partículas que vibram através de oscilações elásticas, que mantem estrita dependência com o meio material para sua propagação. Estas partículas não mudam de posição, mas permitem a propagação de energia por meio delas em meio elástico. As ondas sonoras podem sofrer alterações nas suas propriedades dependendo das propriedades do meio elástico de propagação. As ondas ultrassônicas são ondas mecânicas, que se comportam de forma similar às ondas sonoras audíveis e apresentam frequência de vibração acima de 20 kHz.

2.8.1 Geração de Ondas Ultrassônicas

As ondas ultrassônicas são geradas a partir de dois principais efeitos: o efeito piezoelétrico e efeito Lippmann.

Efeito Piezolétrico

O efeito piezoelétrico é a geração de cargas elétricas através de lâminas de cristais anisotrópicos a partir de deformações mecânicas aplicadas ao material. Com a aplicação de carga mecânica na face oposta, surgirão cargas elétricas positivas e negativas em cada face do material, proporcionais às cargas mecânicas.

Efeito Lippmann

O efeito Lippman é o fenômeno inverso ao fenômeno piezoelétrico, quando ocorrem deformações mecânicas nos cristais anisotrópicos a partir de aplicação de tensões elétricas. Com a deformação do material a lâmina de cristal ao sofrer uma tensão alternada sofrerá deformações mecânicas sucessivas passando a vibrar. A lâmina se contrairá na primeira metade do ciclo da corrente alternada e se expandirá na outra metade. A frequência da vibração mecânica será a mesma da tensão alternada.

Lynnworth (1975) executou trabalho de revisão bibliográfica de diversas técnicas de medição, utilizando o ultrassom. Abordou a medição de vazão, relacionando distância de propagação e velocidade do som; temperatura, em relação à atenuação

da velocidade do som e dependência com calor específico; densidade e porosidade, utilizando princípios de retro-espalhamento e absorção; pressão, em relação à frequência e velocidade do som; além de outras variáveis como: força, viscosidade e nível. As interfaces puderam ser medidas, levando-se em conta a variação da velocidade do som e amplitude do eco de fundo e a temperatura medida.

Chang e Morala (1990) estudaram dois tipos de técnicas ultrassônicas: técnica de pulso-eco e técnica de transmissão. Estas técnicas foram desenvolvidas para aplicação em sistemas hidrodinâmicos, envolvendo níveis de líquidos, fração de vazio e área interfacial.

2.8.2 Fenômeno de Campo Ultrassônico

Na Figura 2.7, tem-se campos ultrassônicos de uma propagação longitudinal, que é dependente do tamanho do transdutor de ultrassom e do comprimento de onda. Como pode ser observado tem-se o campo próximo e o campo distante. As alterações tem forma cônica no campo distante. No campo próximo, há uma variação de intensidade em função da distância, a partir da fonte e também através do feixe. No campo distante, a intensidade diminui monotonicamente com a distância a partir do transdutor.

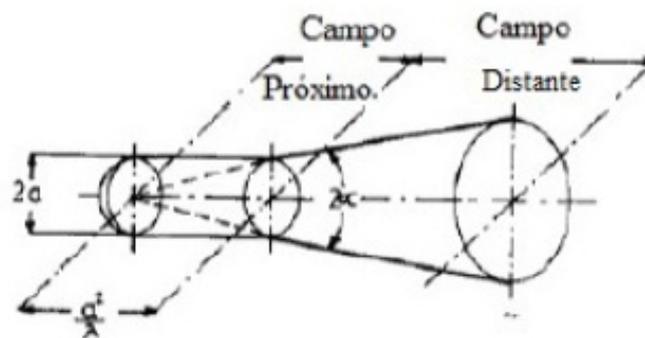


Figura 2.7: Fenômeno de Campo Ultrassônico - Fonte Cunha Filho (2010)

O comprimento da campo ultrassônico próximo ao transdutor pode ser calculado através de,

$$N = \frac{D^2 - \lambda}{4\lambda} \quad (2.92)$$

sendo λ o comprimento de onda ultrassônica e D o diâmetro do transdutor.

2.8.3 Propagação da Onda Ultrassônica

As principais classificações em termos de propagação de ondas empregadas em técnicas de medições ultrassônicas, são as ondas transversais e ondas longitudinais, conforme pode ser visto na Figura 2.8.

O campo ultrassônico apresenta uma região na zona frontal ao transdutor ultrassônico denominada campo morto ou dead zone, provocada pelo pulso inicial, não permitindo a identificação das reflexões, quando aplicada a técnica pulso-eco na aquisição do sinal ultrassônico, conforme Lamy et al. (2007).

Ondas Transversais

As ondas transversais são denominadas de ondas por ação de cisalhamento, sendo necessário para sua propagação uma força de atração de grande intensidade entre as partículas adjacentes, através de ação de deslizamento entre planos vizinhos.

Ondas Longitudinais

As ondas longitudinais se propagam em materiais ou meios elásticos, alterando movimentos de compressões e dilatações e transmitindo vibrações ao longo da propagação. Estas ondas apresentam grande poder de propagação em meios líquidos e gasosos. A velocidade de propagação deste tipo de onda é função das propriedades físico-mecânicas do meio de propagação, Krautkramer e Krautkramer (1977).

A partir da geração de uma onda ultrassônica por uma fonte emissora, ocorre sua propagação em linha reta. Neste trajeto a onda ultrassônica pode incidir contra algum obstáculo, e ocorrer interferência em sua trajetória. Existem três tipos de fenômenos surgidos em decorrência desta interferência, em relação ao comprimento de onda: difração, espalhamento e reflexão, conforme Cunha Filho (2010).

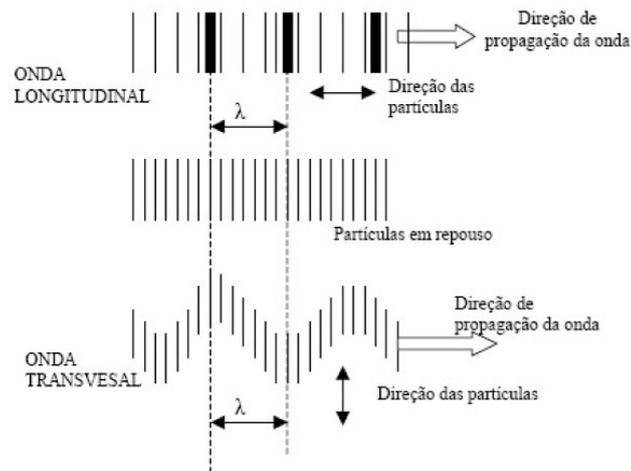


Figura 2.8: Ondas Transversais e Ondas Longitudinais - Fonte Cunha Filho (2010)

Difração de Onda Ultrassônica

Quando da propagação da onda ultrassônica, se a incidência ocorrer em um obstáculo, que tenha as dimensões com a mesma ordem de grandeza do comprimento de onda, surge o fenômeno da difração.

Na Figura 2.9, está mostrado o efeito da difração da onda incidente, ao encontrar um obstáculo, em relação ao movimento e comprimento de onda. Quando o comprimento de onda é muito pequeno, comparado com o tamanho do obstáculo, o efeito de difração pode ser ignorado, considerando-se então a propagação da onda em linha reta, e desprezando-se o obstáculo.

Espalhamento da Onda Ultrassônica

Quando da propagação da onda ultrassônica, se a incidência ocorrer em vários obstáculos, que tenham as dimensões com a mesma ordem de grandeza do comprimento de onda, surge o fenômeno do espalhamento da onda ultrassônica.

Reflexão de Onda Ultrassônica

Quando da propagação da onda ultrassônica, se a incidência ocorrer em um obstáculo, que tenha as dimensões muito maior que a ordem de grandeza do compri-

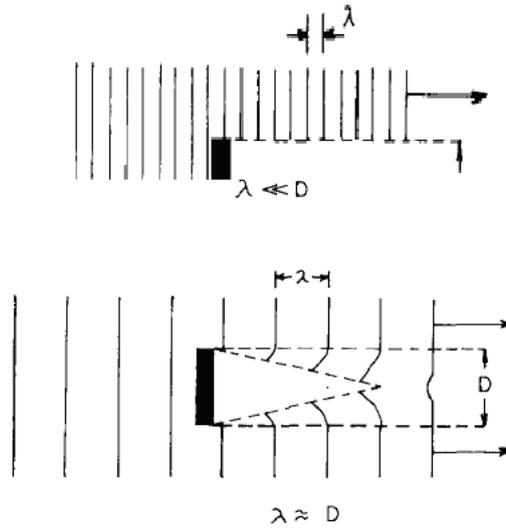


Figura 2.9: Difração de Onda ultrassônica - Fonte Cunha Filho (2010)

mento de onda, surge o fenômeno da reflexão.

Na Figura 2.10, tem-se a representação da incidência da onda entre dois meios físicos distintos, densidade, velocidade do som e impedância acústica, na qual pode observar-se na parede de separação dos meios, a passagem de parte da onda de um meio para outro, e parte da onda por reflexão na parede no próprio meio de incidência.

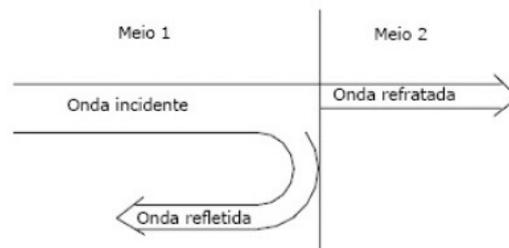


Figura 2.10: Incidência e Reflexão de Onda ultrassônica - Fonte Cunha Filho (2010)

Transdutores Ultrassônicos

Os transdutores ultrassônicos são elementos de transformação de pulsos elétricos em energia mecânica. Os transdutores ultrassônicos são compostos por carcaça, elemento sensor piezoelétrico, conector, eletrodos, membrana protetora, cabo de sinal, bloco de amortecimento e eventualmente de sapata. Os transdutores ultrassônicos são aplicados em contato direto com fluidos, tubulações, e outros, tanto utilizando técnica invasiva quanto não-invasiva, conforme mostrado na Figura 2.11.

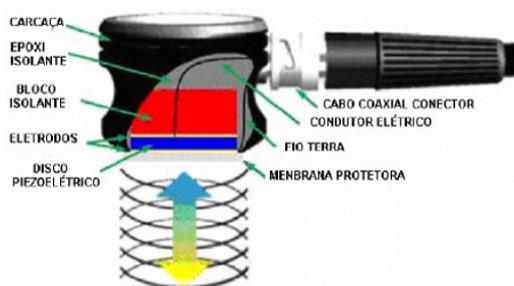


Figura 2.11: Transdutor Ultrassônico - Fonte Cunha Filho (2010)

Chen et al. (1999) realizaram estudos de filtragem de ruídos elétricos e ruídos próprios do sistema ou experimento, a partir da utilização de processamento digital de sinais, Transformada Wavelet Pacote, para melhor avaliação de experimentos, confrontado com outros tipos de filtros por algoritmo de filtragem. Além de estudos de relação sinal-ruído através de gráficos de acordo com as frequências utilizadas na densidade espectral.

Andria et al. (2001), apresentaram trabalho sobre técnica de processamento de sinal ultrassônico, com o intuito de obtenção de precisão na medição de distância ultrassônica, em função do tempo de reflexão do pulso ultra-sônico em uma superfície. Apresentaram gráfico de sinal ultrassônico em função do tempo e sinal normalizado através de análise de tempo-frequência com Transformada de Fourier de Tempo Curto e Transformada Wavelet, obtendo-se gráfico tridimensional contemplando pulso, frequência e número de amostras. O sinal de saída do sensor foi

plotado em função do número de amostras. Além disso, foram elaborados gráficos de erro de resolução temporal em função do comprimento de onda do sinal e utilização de algoritmo de interpolação para redução de erro. O trabalho envolveu a utilização de Transformadas Wavelet, Transformada de Hilbert e Transformada de Fourier de Tempo Curto. Além disso, foi executada também análise de relação sinal-ruído em função de Transformada Wavelet Contínua, Transformada de Hilbert e Transformada de Fourier de Tempo Curto.

Vatanakul et al. (2004) utilizaram a técnica de ultrassônica para medição de hold-up em sistemas multifásicos. A partir de um enfoque estatístico, com aquisições de flutuações dos sinais de ultrassônicos foi possível a detecção de hold-up em fase dispersa em sistema de escoamentos de fases de vapor-líquido-sólido. A comparação com os métodos com transdutores ultrassônicos e transdutores de pressão e sondas, obteve boa concordância. Um gráfico foi elaborado para comparação com a aquisição de sinais, em razão do tempo de transmissão e duração do experimento, considerando os vários tipos de escoamentos ensaiados. Foram executadas várias comparações em relação às distribuições das fases, considerando variações de velocidade do líquido, em relação ao comportamento da distribuição na mistura. Foram utilizados, além do sistema duplo canal pulsador-receptor de ultrassom, mod. FUI 2100, fab. Ultrasonics Fallon, banda de 0,1 a 30 MHz, sondas de ultrassom de 13 mm de diâmetro, transmissor e receptor de 3 MHz.

Matsumoto e Yoshizawa (2005) executaram trabalho de investigação do movimento de uma bolha em relação às características do fluido, utilizando equipamento de ultrassom, relacionando fenômenos térmicos à cavitação da bolha e propagação de ondas de choque e, conseqüentemente a fortes ruídos. Outro estudo envolve a abordagem em relação a um agrupamento de bolhas, salientando as influências ocorridas. Apresentaram resultados de raio do agrupamento de bolhas em função da frequência e pressão interna no centro do agrupamento em função da frequência, além de informações de pressão em função do tempo.

Carvalho et al. (2009) estudaram escoamentos e fenômenos de transporte, através de técnica não-invasiva por ultrassom, com aplicação na investigação de escoamentos bifásicos, através da verificação de atenuação acústica das ondas ultra-

ssônicas, em comparação com dados experimentais de fração de vazão. O aparato experimental consistiu de seção de teste com tubo de acrílico de 54 mm de diâmetro e 5 m de comprimento, transdutor ultrassônico para emissão, com adaptador de 40 mm e três transdutores para recepção de sinal, ao longo do tubo, dispostos em ângulos específicos. Os transdutores utilizados foram de fab. Panametrics VideoScan, de 2,25 MHz, diâmetro 13 mm. A aquisição de imagens foi executada com câmera de alta velocidade de até 1000 fps. A câmera utilizada foi uma RedLake Motion Pro X3, com resolução de imagem de 1280 x 1024 pixels, utilizando o software de processamento de imagens VirtualDub. Observaram que os dados referentes à atenuação acústica, apresentavam uma sistematização nos resultados, relacionados à fração de vazão, proporcionando em eficiência da técnica ultrassônica para a medição de escoamento com fase dispersa. As imagens foram importantes para confrontação com os resultados das atenuações acústicas, relacionadas à fração de vazão.

Matz et al. (2009) apresentaram trabalho de filtragem de sinal ultrassônico para melhoria de relação sinal-ruído em medição ultrassônica. Apresentaram estudo de aplicação de Transformada Wavelet Discreta para filtragem de ruído retro-espalhado em função do tempo e plotagem de gráfico de amplitude versus frequência. Obtenção de sinal ultrassônico contendo eco de fundo e ruído retro-espalhado. Utilizaram as Transformadas Daubechies 4, Daubechies 6, Haar e Meyer Discreta, para análise de melhor desempenho de filtragem, com análise comparativa entre as mesmas. Apresentaram gráficos de relação sinal-ruído em função da amplitude do sinal com filtragem com Transformada Wavelet Pacote, Transformada Wavelet Estacionária e Transformada Wavelet Discreta.

2.9 Técnicas de Medições Ultrassônicas

As principais técnicas ultrassônicas utilizadas em escoamentos, tais como, técnica pulso-eco, técnica de transmissão-recepção e técnica Doppler, são aqui mencionadas. No trabalho foi utilizada a técnica pulso-eco para identificação de interface líquido-vapor, além da técnica Doppler para medição de vazão de líquido na perna quente.

2.9.1 Técnica de Medição Ultrassônica Pulso-eco

A técnica ultrassônica pulso-eco consiste na emissão de um sinal ultrassônico em um meio de propagação, emitido por transdutor ultrassônico de duplo cristal. O sinal ultrassônico ao atingir uma interface na sua trajetória, que na Figura 2.12 (a) é representada por uma bolha de vapor, sofre uma alteração no tempo de trânsito, em relação ao sinal emitido e o refletido e captado pelo próprio transdutor. Um outra condição que pode ser identificada é o desvio da trajetória por conta de escoamentos com pequenas bolhas, conforme mostrado na Figura 2.12 (b). Estas alterações de tempos de trânsito devem-se às diferenças de velocidades do som em cada meio. O sistema de aquisição de sinal ultrassônico mede o tempo de trânsito desde a emissão do sinal até a sua recepção. Através do tempo de trânsito medido, de posse do valor da velocidade do som no meio de propagação conhecido, obtém-se a distância percorrida pela onda ultrassônica até a interface.

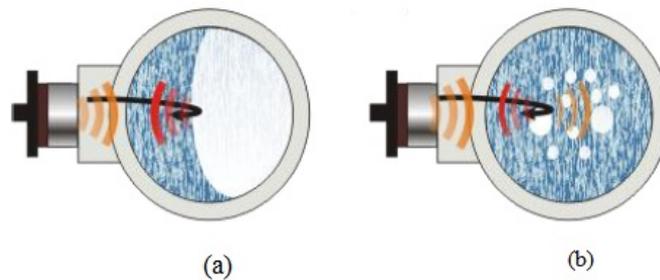


Figura 2.12: Técnica Ultrassônica Pulso-Eco - Fonte Ofuchi (2011)

Matikainen et al. (1986) executaram trabalho para análise de área interfacial, utilizando técnica ultrassônica pulso-eco, a partir de teoria de reflexão de interface esférica, apresentação de desenhos de movimento ascendente de bolhas através de campo ultrassônico, com os padrões de onda adquiridos no osciloscópio. Apresentou correspondências de sinais como esquemático de lógica de sinais, além de gráfico de tempo de retorno do sinal ultrassônico, em função do espaço entre a parede e a linha de centro. Apresentou padrões de escoamentos horizontais e verticais, relacionando a variação de interface com o movimento e crescimento de bolhas.

Oliveira e Costa-Félix (2008) apresentaram trabalho de calibração de transdutor ultrassônico a partir do próprio sinal de eco de fundo ultrassônico, com o intuito de definir o grau de incerteza da medição executada pelo transdutor, para verificação da confiabilidade do mesmo em relação à especificação padrão. Executaram a calibração dos dois padrões de transdutores, de fabricação Panametrics, sendo um do modelo A 303 S de diâmetro de 12,7 mm e frequência nominal de 1,0 MHz e outro do modelo A 304 S de diâmetro 25,4 mm e frequência nominal de 2,25 MHz. utilizaram parâmetro de reciprocidade, calculado a partir dos dados técnicos do transdutor e do meio de propagação da onda ultrassônica. A partir do cálculo estatístico de incertezas de medição foram levantadas as curvas de percentual de incerteza e sensibilidade versus frequência de trabalho do transdutor, considerando as tolerâncias em relação à frequência. Os testes mostraram-se satisfatórios e serviram para definição dos valores de tensão ou corrente compatíveis à geração de pressão ultrassônica.

Um trabalho minucioso sobre princípios de propagação de onda ultrassônica foi desenvolvido por Cunha Filho (2010), que apresentou teoria sobre propagação de ondas transversais em meios sólidos, realçando o comportamento desta onda em função das constantes elásticas do material. No desenvolvimento do assunto relativo às ondas longitudinais, em meios líquidos e gasosos, realçou o comportamento deste tipo de onda em função das propriedades mecânicas do meio. Além disso, apresentou relações matemáticas sobre comprimento e número de onda, além de revisão bibliográfica sobre geração de ondas ultrassônicas e grandezas e fenômenos físicos relacionados à propagação de ondas acústicas.

2.9.2 Técnica de Medição Ultrassônica por Transmissão-Recepção

A técnica ultrassônica por transmissão-recepção consiste na emissão de sinal ultrassônico por um transdutor monocristal, através de um meio de propagação conhecido. O sinal tende a atravessar o meio de propagação e chegar ao outro transdutor ultrassônico monocristal, responsável pela recepção de sinal ultrassônico. O sistema de aquisição de sinal ultrassônico mede o tempo de trânsito, desde o início da emissão do sinal pelo primeiro transdutor até a recepção do sinal pelo

segundo transdutor, conforme mostrado na Figura 2.13. Através de utilização de correlações, alterações no tempo de trânsito e na amplitude do sinal ultrassônico, obtém-se informações para identificação da posição da interface e dos parâmetros dos meios de propagação.

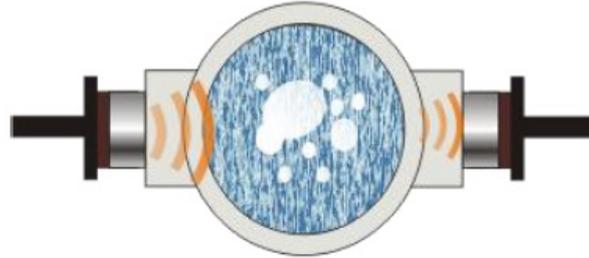


Figura 2.13: Técnica Ultrassônica por Transmissão-Recepção - Fonte Ofuchi (2011)

Massignan et al. (2007) apresentaram trabalho de medição de vazios em escoamentos bifásicos, utilizando a técnica de emissão e recepção de onda ultrassônica, com dois transdutores instalados em coluna de tubo Plexiglass, no modo de transmissão-recepção, para medição de baixa fração de vazio em escoamento bifásico. As medidas foram efetuadas na amplitude do sinal e o tempo de chegada do sinal. Com isso, verifica-se a atenuação do sinal no percurso provocado por diferenças de meios de propagação, devido à viscosidade e condutividade térmica do líquido e também em relação às interfaces. Foram obtidos gráficos de energia média em função da fração de vazio e amplitude do sinal em função do tempo, além da Transformada de Fourier em função da frequência.

2.9.3 Técnica de Medição Ultrassônica Doppler

A técnica ultrassônica Doppler consiste na emissão de sinal por um transdutor ultrassônico de duplo cristal e recepção de sinal por outro transdutor ultrassônico de duplo cristal. Os transdutores devem ser posicionados de modo que as trajetórias se interceptem na linha média de um conduto com diâmetro conhecido. O fluido deve conter micro-partículas ou micro-bolhas dispersas para reflexão do sinal emitido, conforme mostrado na Figura 2.14. O sistema de aquisição de sinal ultrassônico

tem por função identificar alterações na frequência do sinal emitido, com base na informação de frequência do sinal recebido após a reflexão na partícula. A diferença entre as frequências emitidas e recebidas permite calcular a velocidade da partícula. Supondo-se que a partícula tenha a mesma velocidade do fluido, e conhecendo-se seção transversal ao escoamento pelo diâmetro conhecido, obtém-se a vazão do fluido no conduto.

Murakawa et al. (2005) estudaram aplicação de método Doppler em escoamento borbulhante, utilizando duas frequências ultrassônicas. Utilizaram sistema multi-modo com frequência de 2 e 8 MHz, com posicionamento transdutor a 45 graus. Apresentou gráfico de distribuição de velocidade de escoamento monofásico. Apresentaram gráfico de Função Densidade de Probabilidade em função da razão da velocidade de líquido e bolhas. Foram apresentados resultados de velocidades em função de altura e posição. Este método foi comparado com outros similares em função da diminuição do número de bolhas.

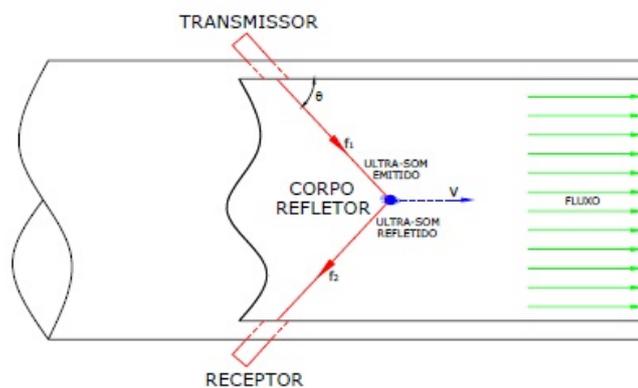


Figura 2.14: Técnica Ultrassônica Doppler - Fonte Paulino (2007)

2.10 Técnica de Aquisições de Imagem

Babelli et al. (1994) realizaram estudos de visualização, através de câmera acoplada a um gravador de video, com iluminação através de lâmpadas estroboscópicas, em seção de teste aquecida transparente, para verificação dos efeitos de transição de regimes de escoamentos, envolvendo o fluxo de calor crítico e fração de vazão. Uti-

lizaram como líquido de teste, o Freon 113, com velocidades de 1,8 a 26,8 cm/s e temperatura na faixa de 20 a 45 oC, o qual foi injetado na seção de teste, constituída por dois tubos coaxiais de quartzo de um metro de comprimento, com seções transversais de um tubo medindo 18 x 15 mm e do outro medindo 35 x 31 mm, resultando em um vão entre eles de seção transversal de 31 x 18 mm. Esta injeção de fluido provocou um filme na superfície de quartzo, que apresentava condição de temperatura muito superior à temperatura de ebulição do líquido de teste, conseguida através de trocador de calor, com circulação forçada de fluido Syltherm 800, fab. Dow Corning, ocasionando deste modo alteração brusca no regime de escoamento. Os diversos regimes de escoamento provocados por esta situação, com transição do pré-fluxo de calor crítico e ao fluxo de calor crítico local, consequente da configuração anular dos tubos, conjugada com a transferência de calor entre as superfícies, puderam representar uma condição em regime estacionário, que definiu três regiões de escoamento: escoamento áspero ondulado, escoamento agitado e escoamento de fase dispersa, onde podem ser melhor observados, através das filmagens realizadas.

Kirouac et al. (1999), elaboraram trabalho para indicação de instrumentação adequada para medições de escoamentos bifásicos verticais, sendo citado a utilização de câmera de alta velocidade para visualização de coalescência, tamanho de bolha, força de arraste, velocidade de escoamento de ascensão, além de padrões e escoamentos, frações de vazios, velocidades de líquido e gás. As técnicas puderam ser confrontadas para as validações pertinentes.

Dinh e Choi (1999) realizaram trabalho de investigação de método para identificação automática de bolha, que compreende a aquisição de imagem, processamento da imagem para redução de ruído, detecção de borda e linearização para realce da imagem e extração da bolha. Este método é vantajoso, pois permite o estudo, em curto espaço de tempo, da quantidade de bolhas através de uma grande quantidade de imagens. Observa-se o experimento composto por seção de teste com tubulação transparente de diâmetro interno de 30 mm e 1,5 m de comprimento. O escoamento desenvolvido é bifásico ar-água, obtido com injeção de ar na coluna d'água, através de circuito hidráulico fechado, incluindo tanque desaerador.

Coleman e Garimella (1999) realizaram estudos para investigação do efeito do diâmetro e da forma do tubo nas transições de regime de escoamento, com padrões de escoamentos para diâmetros hidráulicos, que variam de 5,5 a 1,3 mm, considerando escoamento bifásico em tubos de pequeno diâmetro. A partir de filmagens em alta velocidade foi possível executar análise de escoamentos, de modo a obter os mapas de escoamentos e as respectivas transições nos mesmos, em situações de contracorrente de escoamento bifásico desenvolvido em misturas horizontais, considerando tubos redondos e retangulares. Foram identificados padrões de regimes de escoamentos a partir de filmagem com câmera digital Canon ES 5000 de 8 mm, utilizando zoom de 40x80, velocidade do obturador de 0,0001 s e 0,003 s, além de gravador de vídeo Super-8. As velocidades superficiais de gás estiveram na ordem de 0,1 a 100 m/s e de líquido na ordem de 0,01 a 10 m/s. A visualização do escoamento foi executada através de câmera CCD fab. Pulnix Inc., Modelo 9701, com alta velocidade de captura de imagem dinâmica com resolução completa de quadro vertical e horizontal. Velocidade do obturador eletrônico foi fixada no valor de 1/500 s, obtendo-se perfeita nitidez. Utilizou-se lentes motorizadas Fujinon D6X8.5C-MPX21 de 8,5 a 51 mm. Os parâmetros das bolhas desempenham um papel importante na predição a dinâmica da fração de vazio, bem como no comportamento da fração de vazio em escoamentos bifásicos, encontrados em diversos processos industriais, químicos e de reatores nucleares. A investigação inicial ficou restrita à identificação automática e medição dos parâmetros da bolha no fluxo borbulhante, em que as bolhas se movem, de forma lenta, sendo desnecessário um tempo longo de gravação.

Um estudo de investigação de geysering, definido como movimento periódico de formação e ascensão da bolha, foi realizado por Takemoto et al. (1999), através da mistura com líquido sub-resfriado, condensação e reentrada no canal aquecido. O fenômeno pode ocorrer no início de ebulição em circulação natural com a bolha slug, interrompendo a entrada do canal aquecido. O processamento de imagem para medição de coalescência de bolha em escoamento vertical bifásico do tipo ar-água foi executado para escoamento do tipo slug de múltiplas bolhas. As medições de diferencial de pressão, espessura do filme em volta da bolha, a espessura do filme e a distância da cabeça da bolha foram realizadas. A medição da velocidade na subida

foi executada através de imagens de câmera digital. A relação entre velocidade da bolha e velocidade do líquido também foi analisado. Os métodos de medição por imagem e por sensor foram confrontados. A relação entre diferencial de pressão e tempo foi analisada, considerando a velocidade de subida da bolha.

Um trabalho experimental foi apresentado por Lacknermeier et al. (2001) para visualização de estruturas de escoamentos no interior de ponto superior com diluição de leite fluidizado, com cortes transversais em volume, para concentrações na faixa de 0,1 a 1 percentual de volume. A técnica de vídeo em alta velocidade foi conjugada com um endoscópio ótico e equipamento a laser. A câmera de vídeo de alta velocidade selecionada para a presente investigação é do tipo Ektapro Motion Analyser, de fab. Kodak, que permite taxas de até 6.000 fps, com obturador de até 10 ms, alta sensibilidade à luz em 810 nm e uma resolução de imagem de 192 x 239 pixels com 256 níveis de cinza. O sistema apresenta um dispositivo de armazenamento quadro a quadro para 512 imagens completas, com tempo de observação gasto de 0,5 s e uma taxa de frame de 1000 imagens por segundo. A aquisição de imagens mostrou que não depende só de um equipamento de filmagem de ótima qualidade, mas também de iluminação adequada. A resolução ficaria comprometida, em razão do tipo de campo de observação que necessita ser estudado, pois isto depende da perfeita interação com a iluminação utilizada. Outro problema difícil de se contornar foi o de realce de algumas estruturas, que deveriam estar mais bem definidas pela estrita dependência de recurso de sensibilidade da câmera quanto do software utilizado.

Um trabalho experimental para investigação de escoamento induzido por cadeia de bolhas em ascensão foi elaborado por Liu et al. (2005), que utilizou aquisição e processamento de imagem para análise de diversas figuras de bolhas em movimentos oscilatórios, provocados em razão da baixa viscosidade do fluido. O movimento ascendente de bolhas provocou o fenômeno de indução denominado de falsa turbulência. A aplicação de técnica de aquisição e processamento de imagem reforça a sua aplicação no estudo deste tipo de comportamento. O processo de captura de bolhas são posicionadas em relação ao eixo de referência para identificação da trajetória e velocidade. O trabalho foi importante para identificação de campos de velocidade no líquido.

Um trabalho de processamento de imagem de ciclos de circulação natural para estudos de padrões de escoamentos bifásicos verticais, foi elaborado por Mesquita et al. (2012), que considerou as transições de fases e instabilidades, aplicando simulação com lógica fuzzy para reconhecimento de padrões e detecção de instabilidades no escoamento, a partir da aquisição e processamento de imagem com extração de características a partir de graus de cinza. Um gráfico de temperatura e outro de comportamento periódico da temperatura foram elaborados em função do tempo. O processamento de imagem foi executado com MatLab, produzindo imagem em graus de cinza. A extração de características da imagem processada estabeleceu as fases de incubação, expulsão e preenchimento com geração de graus de cinza, a partir destas características. O passo seguinte foi utilizar a inferência por lógica fuzzy para classificação destes resultados em termos percentuais e superposição das mesmas para obtenção de fração de vazio por este processo.

Capítulo 3

Equipamento e Técnica Experimental

Os experimentos foram realizados no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), no Laboratório de Termo-Hidráulica Experimental (LTE), onde encontram-se instalados, conforme mostrado na Figura 3.1, o Circuito Experimental de Água para realização de experimentos de escoamentos horizontais e o Circuito de Circulação Natural (CCN), objeto deste trabalho.



Figura 3.1: Laboratório de Termo-hidráulica Experimental

Esta instalação experimental, construída em escala reduzida em altura e volume em relação ao AP 600, dispõe de componentes básicos que requerem procedimentos básicos para o adequado funcionamento da instalação e, também dos ajustes

nos sistemas de aquisições e processamentos de sinais e imagens.

3.1 Preparação do Experimento

A preparação do Circuito de Circulação Natural inclui o enchimento dos circuitos primário e secundário, posicionamento e ajustes dos sistemas de aquisição de imagem e sinais ultrassônicos. O circuito experimental, mostrado na Figura 3.2, é composto pelas seções do aquecedor, trocador de calor, tubulação da perna quente, tubulação da perna fria e tanque de expansão.

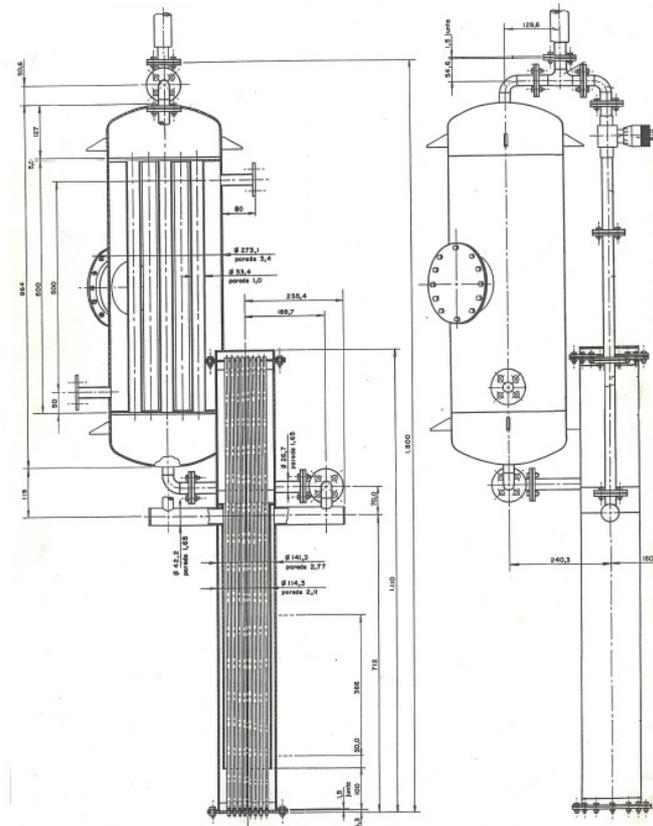


Figura 3.2: Circuito de Circulação Natural (CCN)

3.1.1 Enchimento do Circuito Primário

Para enchimento do circuito primário é necessário verificar-se, inicialmente, os níveis de água de dois tanques de água destilada, que estão interligados por um barrilete. O volume de água contido nos tanques destina-se à alimentação de

água para enchimento do circuito primário de circulação natural. Um registro geral conectado ao barrilete permite a manobra para alimentação de água no lado de sucção da bomba de transferência de água destilada. O funcionamento da bomba possibilita o completo enchimento do circuito de circulação natural. A velocidade de enchimento é ajustada pelo registro globo existente na entrada do aquecedor.

O aquecedor funciona de forma análoga ao núcleo do reator APWR, cuja potência térmica gerada equivale em escala à potência de decaimento das reações nucleares no núcleo do reator, em condição de sub-criticalidade. A potência térmica é gerada no aquecedor por 52 resistores elétricos de aquecimento de imersão, com taxa de potência de 30 W/resistor. Os resistores encontram-se instalados no interior de tubos de aço que são envolvidos, internamente, por outro tubo cilíndrico de aço com 0,204 m de diâmetro interno e altura total de 1,0984 m, conforme mostrado na Figura 3.3.

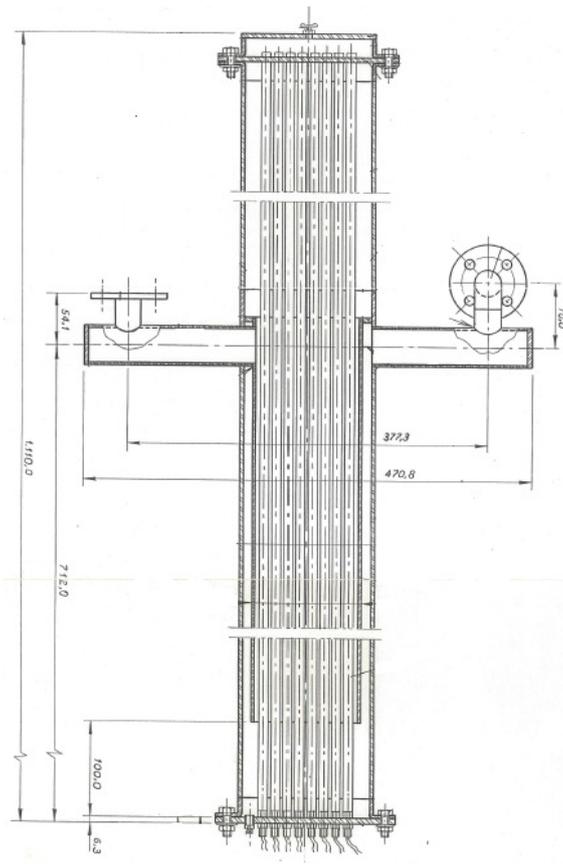


Figura 3.3: Feixe de Aquecimento por Resistores Elétricos

O arranjo dos resistores elétricos no aquecedor, segue a mesma orientação do arranjo das barras de combustíveis no núcleo do reator de água pressurizada. Este conjunto de resistores elétricos é denominado feixe de aquecimento. A potência elétrica máxima gerada pelos resistores elétricos de aquecimento é de aproximadamente 1,56 kW, conforme mostrado na Figura 3.4.

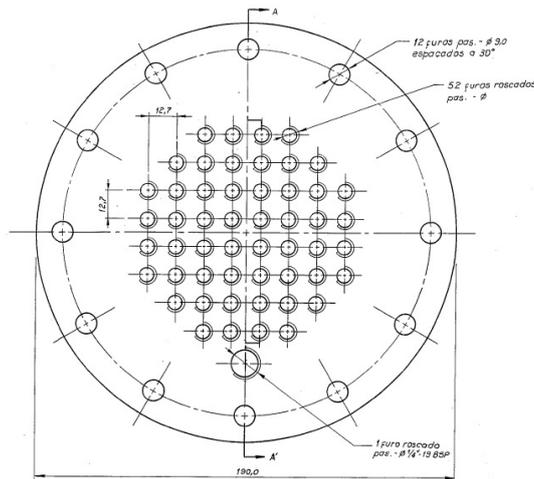


Figura 3.4: Detalhe da Montagem do Arranjo dos Resistores de Aquecimento

Na parte interna do aquecedor, encontram-se as subseções denominadas de downcomer, plenum inferior e plenum superior. O downcomer é um canal vertical com altura de 0,61 m, posicionado entre o feixe de aquecimento e a parede externa do cilindro do aquecedor. Esta região corresponde à descida do escoamento do fluido primário proveniente da saída da perna fria. O fluido primário escoado pelo downcomer é direcionado à entrada do feixe de aquecimento. Esta entrada é denominada de plenum inferior, ou também conhecida por entrada do aquecedor, cuja altura é de 0,10 m. Na parte inferior do plenum inferior encontra-se instalado um registro para drenagem de água na entrada do aquecedor após o esvaziamento do circuito primário.

O enchimento do circuito primário é executado de forma ascendente, do aquecedor para o trocador de calor. Por ser ascendente a velocidade de enchimento deve ser a mais baixa possível, de modo a evitar borbulhamentos e, conseqüente, inserção de ar no circuito. Para a purga de possíveis volumes de ar presentes no circuito

primário, uma válvula instalada no topo do aquecedor é mantida aberta desde o início do enchimento. Esta região do aquecedor é denominada de plenum superior. O nível de água ao alcançar a válvula no plenum superior produz um escoamento de drenagem pela válvula. Esta drenagem é mantida até que o escoamento esteja ocorrendo sem a presença de bolhas. A válvula é fechada após a drenagem do volume de líquido expurgado. O enchimento prossegue pelas pernas quente e fria e o nível de água alcança a entrada do trocador de calor.

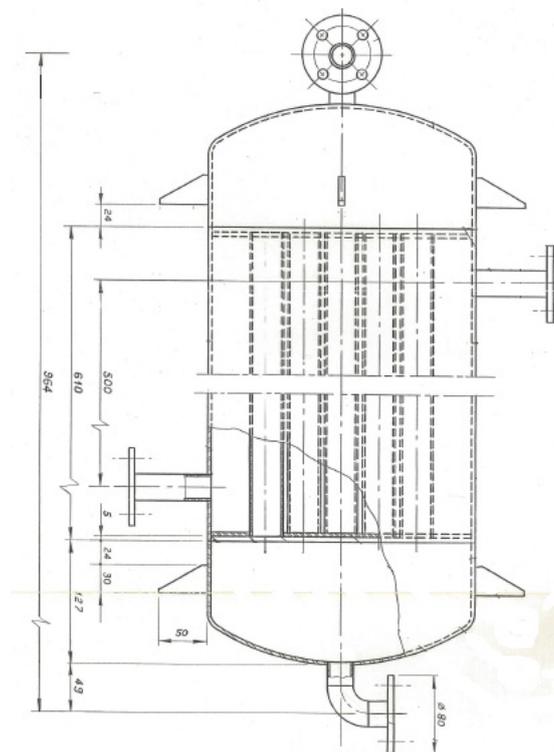


Figura 3.5: Detalhe da Montagem do Trocador de Calor

O trocador de calor representa o conjunto trocador-reservatório de recarga de combustível do protótipo de remoção passiva de calor residual (PRHR-HX). O trocador de calor com altura de 0,60 m, encontra-se situado a 0,944 m acima da seção ativa de aquecimento, sendo composto por 7 tubos retos verticais de aço inoxidável com 0,031 m de diâmetro interno, conforme mostrado na Figura 3.5. Estes tubos estão dispostos em arranjo triangular e são utilizados para a descida do fluido primário no interior do trocador de calor. Os tubos estão montados, internamente, em outro cilíndrico de de 0,40 m de diâmetro interno, por onde circula

a vazão de resfriamento secundário. A área de escoamento de um dos tubos do trocador de calor é cerca de 0,935 vezes a área de escoamento de um dos canais do feixe de aquecimento. O trocador de calor é o responsável pela retirada de calor do fluido do sistema primário, através de circulação de água de resfriamento secundário. Após a troca de calor entre os sistemas primário e secundário, a água de resfriamento do sistema secundário é drenada para a rede de esgoto do prédio.

A perna quente é formada por duas seções flangeadas de tubos com 0,302 m de comprimento, fabricado em aço inoxidável com diâmetro interno de 0,0234 m. A outra seção que compõe a perna quente é fabricada em tubo de vidro transparente de boro-silicato de mesmo comprimento e mesmo diâmetro interno das outras seções, e instalada entre as mesmas, conforme mostrado na Figura 3.6. A perna quente tem origem no aquecedor e destina-se à entrada do trocador de calor. A perna fria, por sua vez, tem origem na saída do trocador de calor e destina-se à entrada do downcomer. As tubulações das pernas quente e fria têm diâmetros internos que atendem ao critério de similaridade em relação ao fator de fricção global.



Figura 3.6: Visor de Vidro - Perna Quente

Um tubo cilíndrico de aço na posição vertical, denominado de coluna de expansão, com diâmetro interno de 0,20 m interliga a perna fria ao tanque de expansão, que tem como função absorver as variações de volume do fluido primário circulante e atuar como um pressurizador, encontrando-se parcialmente preenchido com água. Uma válvula de alívio de pressão encontra-se instalada no topo do tanque de ex-

pansão, com a função de eliminar sobrepressões advindas de acúmulo de gases no sistema primário. Neste tanque encontra-se instalado um sensor de nível de água, do tipo ultrassônico, para monitoração da elevação do nível d'água, decorrente da expansão térmica do sistema primário. O tanque de expansão está posicionado a cerca de 2,17 m a partir da parte inferior da seção do aquecedor. Deste modo, a pressão na metade do aquecedor é de cerca de 0,12 bar.

O sistema primário está termicamente isolado do ambiente do laboratório, por uma camada de lã de vidro de 1 cm de espessura, para revestimento do cilindro do trocador de calor. A circulação da água de resfriamento no lado secundário do trocador de calor encontra-se na mesma temperatura do ambiente do laboratório.

3.1.2 Enchimento do Circuito Secundário

Para enchimento do circuito secundário, é necessária a abertura de válvula de esfera, posicionada na entrada da alimentação da água proveniente do sistema predial. Após esta válvula, abre-se também um registro globo na entrada do sistema de filtragem e por fim, procede-se à abertura de válvula de esfera na entrada do barrilete de alimentação geral, que atende a todos os sistemas do laboratório. Os três dispositivos de manobra encontram-se em série na linha de escoamento de alimentação de água.

O circuito secundário do Circuito de Circulação Natural tem sua alimentação de água, através de exclusivo reservatório com nível d'água controlado por bóia mecânica. Na saída deste reservatório encontra-se conectado um dispositivo de manobra, que está posicionado na entrada de alimentação de água do circuito secundário do trocador de calor, conforme mostrado na Figura 3.7.

O dispositivo de manobra é composto por uma válvula de três vias e dois rotômetros. A válvula de três vias permite a escolha de uma opção para circuito fechado, quando é feito o bloqueio do escoamento da vazão de resfriamento secundário, sempre que o sistema de resfriamento não esteja em operação. A opção de circuito em condição de by-pass destina-se ao enchimento rápido do trocador de calor sem passar pelos rotômetros. Nesta condição de enchimento o registro de saída do dreno é mantido aberto até que a vazão de resfriamento secundário passe

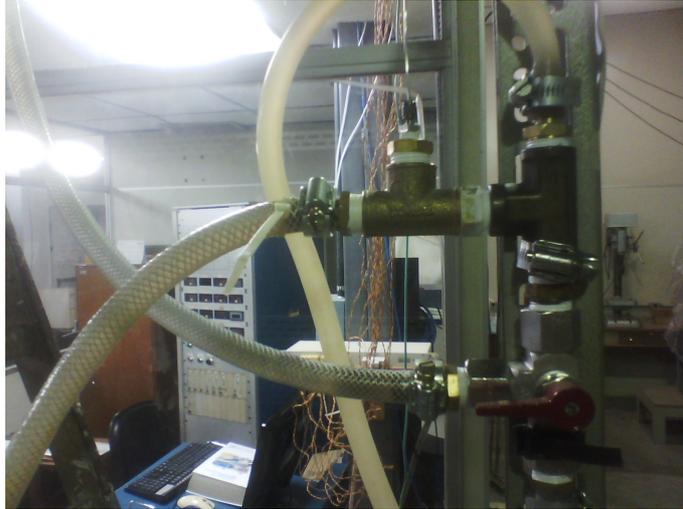


Figura 3.7: By-pass - Sistema de Resfriamento Secundário

a escoar pelo dreno, quando então é fechado o registro. Para retirada de ar do sistema é aberta a válvula de saída do trocador de calor. Após a retirada de ar do sistema o circuito é manobrado para a condição de fechado. A opção para circuito em condição de medição e controle de vazão correspondente à condição normal de operação, pode ser utilizado um dos rotômetros. Um rotômetro permite o ajuste de vazão de resfriamento secundário de 0 a 6 L/h e o outro rotômetro pode ser ajustado de 0 a 25 L/h.

3.1.3 Posicionamento e Ajuste da Câmera de Alta Velocidade

O sistema de aquisição de imagem emprega uma câmera digital policromática de alta velocidade, com capacidade nominal de até 1.000 frames por segundo em resolução máxima, utilizando-se recurso adicional de poder-se conseguir aumento de velocidade através de uma função Windowing, conjugado automaticamente com o zoom, para redução do tamanho da imagem, o que proporciona chegar-se a uma velocidade máxima de 33.000 fps. A iluminação adicional requerida para filmagens em ambientes internos está na faixa de 500 a 2.000 watts. Para a iluminação com 500 watts a velocidade indicada é de 1.000 fps.

A alimentação elétrica da câmera é executada por tensão estabilizada em 110 V, monofásico, 60 Hz. Esta tensão alimenta um conversor de tensão, que encontra-

se conectado à câmera fornecendo uma tensão secundária de 24 V. A conexão da câmera com o computador é executada através de cabo de dados.

A câmera é posicionada em frente à seção transparente da perna quente, com a adequada distância, de tal forma que possibilite a aquisição de imagens, contemplando todo o comprimento da bolha e a evolução do escoamento do fluido primário. As lentes utilizadas na câmera são então ajustadas de acordo com a distância focal, que deve ser compatível com a distância entre a seção transparente e a lente da câmera. A abertura do obturador de estar de acordo com o nível de iluminamento na região da seção transparente. Finalmente, executa-se o ajuste do foco da imagem. Este processo de ajuste é executado através de visualização da seção transparente no monitor do computador, utilizando-se o aplicativo para aquisição de imagem do software i-Speed Suite. Ao lado da seção transparente encontra-se instalada uma régua graduada, de modo a permitir o adequado processamento de imagens, utilizando-se a equivalência entre os valores definidos pela escala graduada e os valores em pixels definidos pelo software de processamento de imagens.

Para a abertura do aplicativo escolhe-se um diretório para abertura de nova pasta renomeada, de acordo com o ajuste ou aquisição a ser executado. Após a abertura da pasta procede-se à colocação da imagem da câmera na tela do computador. O acionamento do botão Adicionar câmera é executado, após a prévia seleção da nova pasta no diretório, com o acionamento do botão Selecionar. Ao adicionar a câmera aparece na tela uma janela com os dígitos de IP da câmera, que corresponde ao número 192.168.0.54. Ao confirmar este IP aparece na tela a informação de que a câmera está habilitada.

A habilitação da câmera permite a visualização da imagem em modo Ao vivo. Nesta condição, com o acionamento do botão Vídeo, a câmera pode ser ajustada para ajuste de gravação com a taxa de frames, de acordo com o adequado nível de iluminamento. Um outro ajuste é executado com o acionamento do Botão Modo. Com este botão atuado é ajustado o valor de modo de imagem em condição de resolução ao vivo em 800 x 600 pixels.

3.1.4 Posicionamento e Ajuste dos Transdutores Ultrassônicos

Posicionamento e Ajuste dos Transdutores Ultrassônicos - Pulso-Eco

Os transdutores ultrassônicos do tipo pulso-eco de frequência 10 Mhz e diâmetro de 0,5 polegadas encontram-se fixados a suportes, em posição vertical paralela à tubulação da perna quente, que os mantém pressionados à seção transparente desta tubulação. Antes da execução dos experimentos, as faces dos transdutores recebem uma camada de acoplante para garantir perfeito acoplamento entre as superfícies e proporcionar a perfeita propagação das ondas ultrassônicas. Esta operação de ajuste é suportada pelo sistema de aquisição de sinais ultrassônicos, que através do sistema supervisorio em LabView possibilita verificar os sinais de eco de fundo e suas reflexões. Os parâmetros de ajustes são definidos e anotados para utilização nos experimentos.

Posicionamento e Ajuste dos Transdutores Ultrassônicos - Doppler

Os transdutores ultrassônicos do tipo Doppler encontram-se fixados a suportes na posição horizontal transversal à tubulação da perna quente, que os mantém pressionados na posição vertical à tubulação. Antes da execução dos experimentos, as faces dos transdutores recebem uma camada de acoplante para garantir perfeito acoplamento entre as superfícies e proporcionar a perfeita propagação das ondas ultrassônicas. Esta operação de ajuste é suportada pelo sistema de aquisição de sinais ultrassônicos, através do sistema de controle e supervisão próprio. Para definição dos ajustes é executada a configuração dos parâmetros das variáveis de medição e parâmetros de controle da unidade de processamento. Os parâmetros de ajustes são definidos e anotados para utilização nos experimentos.

3.1.5 Banho Termostático para Avaliação de Termopares

Introdução

O equipamento de banho termostático é adequado para utilização em temperaturas de operação, tendo uma entrada embutida para serpentina de resfriamento de água, a uma temperatura mais baixa do que uma dada entrada de temperatura, que possa ser alcançada e mantida. Com imersão opcional, utiliza-se fluxo através de unidades de resfriamento com a atuação de compressores de refrigeração, podendo ser mantida uma faixa de temperatura substancialmente baixa. O controle de temperatura eletrônico Anti-Drift ajusta a potência do aquecedor automaticamente para a variável necessária para operação. O conjunto é composto por: ajuste manual de temperatura pré-definida, mostrador analógico para temperatura real do banho, sensor de controle Pt 100, o controle de temperatura eletrônico Anti-Drift, que ajusta automaticamente a potência do aquecedor para as mudanças necessárias durante a operação, elemento aquecedor, serpentina de resfriamento, bomba de pressão e sucção, bem como limitadores de excesso de temperatura e nível de líquido, os quais são completamente independentes dos controles eletrônicos.

Descrição do Sistema

A unidade só deve ser ligada a uma tomada aterrada. É importante comparar a voltagem da rede com as especificações de tensão da placa de identificação na unidade antes da ligação. O preenchimento de líquido do banho deve atender a um nível em relação à placa de cobertura, nível máximo até 2 cm abaixo e nível mínimo até 6 cm abaixo. Sistemas externos, fechados ou abertos, que incluem um sistema de circulação devem ser analisados junto ao líquido do banho de modo que, durante a operação e após cada operação o nível do banho deve ser checado. Se o recipiente do banho não for preenchido suficientemente com líquido, a chave de nível baixo de líquido, acionada pela bóia, desligará o aquecedor e bomba, acendendo indicador de mau funcionamento. No caso de operações com alcances muito amplos a serem cobertos, deve ser considerado que o nível de líquido poderá subir e ocorrer transbordamento, causado pela expansão térmica do líquido. O ponto de desligamento

por excesso de temperatura deve ser ajustado de acordo com o ponto de fulgor do líquido de banho escolhido.

Na parte frontal do equipamento podem ser identificados os seguintes componentes: chave de controle mestre com luz verde integrada, sinalização com luz amarela para verificação de controle do aquecedor, potenciômetro para ajuste fino de temperatura, chave seletora manual para ajuste de valor de temperatura pré-ajustada, chave de reversão para controle interno e externo, mostrador analógico, sinalização com luz vermelha de indicação de mau funcionamento, chave de permissão de funcionamento, limitador de excesso de temperatura, gaxeta e parafuso de fixação.

Na parte traseira do equipamento podem ser identificados: cabo de força, fusível, tomada para conexão de controlador de temperatura remoto, tomada para cabo de controle para vaso do banho refrigerado (quando necessário), tomada para elementos com funções de segurança interno ou externo, porta de fixação de resfriamento, porta de fixação por pressão, parafuso excêntrico de vedação, bomba de pressão ou sucção, sensor de sobre-temperatura para temperatura de banho, sensor de controle de temperatura Pt 100, chave de nível para flutuação em nível baixo, parafuso rápido, porta de fixação por sucção, fusível, válvula de controle de fluxo.

As conexões de mangueira e válvulas de fluxo devem controlar a temperatura em complemento com somente um vaso de banho integrado, além de fechar porta por pressão e porta de sucção com mangueira. As conexões de circuito fechado de líquido, por exemplo, instrumentos ou aparatos com capa firmemente apertada ou tubo resfriado para controle de temperatura.

A temperatura do banho deverá ser identificada pelo mostrador analógico, sendo que pequenos desvios entre a temperatura pré-ajustada e a real podem ser causados pelo comportamento da temperatura ou resistência do sensor de controle Pt 100, que não é exatamente linear. Assim sendo, pequenas tolerâncias podem ser admitidas acima ou abaixo do valor de calibração. Estes desvios podem ser compensados com o auxílio do potenciômetro, que pode ser ajustado com a utilização de chave de fenda.

Segurança do Sistema

A princípio para a atuação de qualquer uma das chaves, deve ser verificado se o limitador de excesso de temperatura está claramente ajustado para um valor acima do pré-ajustado. Pressionando-se a chave principal, ocorre o acendimento da lâmpada verde integrada ao controle principal, o mostrador analógico deverá indicar a temperatura real do banho, logo após o motor da bomba funcionar, o líquido do banho passa ser recirculado e possibilita que a temperatura pré-setada seja maior que a temperatura do banho, acendendo também a luz de controle do aquecedor, indicando que o elemento aquecedor está funcionando. Durante a fase de aquecimento deverá ficar sempre ligado e durante a fase de controle deverá piscar a intervalos curtos. Se a temperatura do banho indicada pelo mostrador estiver acima da temperatura pré-setada, então o sistema deverá ser desligado.

Os dispositivos de segurança da unidade são completamente independentes do controle eletrônico de temperatura, isto é, a segurança operacional é garantida mesmo que a unidade funcione sem supervisão. No caso de mau funcionamento, por exemplo, excesso de temperatura, baixo nível de líquido ou bloqueio da bomba por entupimento, por líquido com alta viscosidade ou objeto estranho, o respectivo dispositivo de segurança desligará, permanentemente, a bomba e o aquecedor, acendendo a luz de indicação de mau funcionamento. Para o reinício, a chave de liberação deve ser pressionada em primeiro lugar, e liberará o sistema desde que a anormalidade tenha sido corrigida.

O limitador de excesso de temperatura protege a unidade contra aquecimento descontrolado, além do valor pré-setado de temperatura ou algo que pudesse acontecer por falha eletrônica. A temperatura de corte deverá ser ajustada com auxílio do limitador de excesso de temperatura. A proteção depende que tenha sido escolhido o ponto de corte convenientemente. A proteção contra ignição do líquido do banho, o excesso de temperatura no ponto de corte deverá ser suficientemente abaixo do ponto de fulgor do líquido escolhido para o banho. O limitador de excesso de temperatura deverá ser ajustado pela escala, que pode somente oferecer um valor aproximado para o ponto de corte a ser selecionado. Isto nunca pode ser considerado como substituição para o ajuste exato da temperatura pré-setada.

O limitador de baixo nível de líquido protege a unidade contra a perda de líquido do banho abaixo de um nível de segurança fixado. Este dispositivo assegura que o nível do líquido nunca desça abaixo do elemento aquecedor, uma condição que levaria à destruição da resistência ou bobina do aquecedor, se o líquido for inflamável, poderá se inflamar e causar incêndio. Se o nível do líquido descer abaixo do nível de segurança fixado, o indicador vermelho de mau funcionamento deverá acender e o limitador de baixo nível de líquido, ativado pela bóia, deverá cortar o funcionamento da unidade permanentemente. Logo que o líquido do banho seja repostado e a bóia tenha subido acima do ponto de corte, a unidade pode ser iniciada novamente com o pressionamento da chave de liberação.

3.1.6 Calibração por Comparação do Sistema de Aquisição de Dados de Temperatura

Introdução

O Circuito de Circulação Natural (CCN) é formado por: Sistema de Alimentação e Controle de Potência (SACP), Sistema de Aquisição de Dados de Pressão e Temperatura. Esta descrição técnica estabelece os passos das etapas da calibração, por comparação com uma referência calibrada do Sistema de Aquisição de Dados e Temperatura (SADT). O Sistema de Pressão não encontra-se em operação, em virtude de compasso de espera para compra de sensores de pressão.

Descrição Geral do Sistema

O Sistema de Aquisição de Dados e Temperatura (SADT) é constituído por: 12 (doze) termopares de Chromel-Alumel , com diâmetro de 1,5 mm, dispostos ao longo do Circuito de Circulação Natural (CCN); 12 (doze) amplificadores de sinais de termopares, modelo AD595CD; placa conversora Analógico-Digital (A/D) com 16 (dezesesseis) canais de leitura e 12 (doze) bits de resolução, AX5412 e computador PC-486 DX-4 100 MHz . Os sinais de temperatura, em milivolts, gerados nos termopares são amplificados nos amplificadores de sinais, convertidos pela placa conversora A/D para sinais digitais lidos, transformados em unidades de temperatura e gravados no

computador por software LabView, para posterior análise.

Procedimento de Calibração do SADT

Para calibração do SADT do Circuito de Circulação Natural (CCN), foi utilizada a montagem com 12 (doze) termopares de Chromel-Alumel, em formação circular, imersos em cuba de banho termostático, ajustada a temperatura a ser medida e obtida pelo aquecimento do fluido por resistências elétricas, controladas por controlador de temperatura equipado com sensor e com agitador mecânico do banho.

As leituras das temperaturas do banho foram realizadas, usando-se termopares de Chromel-Alumel comparados com termômetro de referência de vidro. A faixa de temperatura estabelecida foi de 30 a 95 °C, com variação mínima de cerca de 10 °C. Inicialmente, o banho termostático e o SADT foram e a água contida na cuba do banho aquecida até a temperatura inicial de calibração. Quando a temperatura de calibração foi atingida, manteve-se um período de 5 a 15 minutos entre as etapas intermediárias, para que a estabilidade térmica fosse alcançada. Através de software foram obtidos os valores de temperatura para cada termopar. O processo de medição de temperaturas terá prosseguimento, com execuções de novas medições, na faixa de temperaturas de 95 a 130 °C, utilizando solução com parafina, compatível com estes limites e em condições de plena segurança.

Os valores médios das temperaturas obtidas pelos termopares foram comparados com as medidas pelo termômetro de referência de vidro, para análise estatística de erros e conclusões futuras. Os erros médios (em toda a faixa de temperatura) foram obtidos para cada canal de temperatura do SADT, utilizando gráfico para obtenção de curva de medição de temperatura.

Na curva de calibração foram representados valores das temperaturas para um canal do SADT e as temperaturas medidas pelo termômetro de referência. A partir destes dados foram calculados os parâmetros de calibração para cada um dos termopares e implementado no software de leitura a correção na forma de um polinômio do primeiro grau $y = ax + b$.

3.1.7 Estimativa da Incerteza na Calibração do SADT

Para determinação da incerteza na calibração do SADT utilizam-se valores de erros associados aos componentes e instrumentos de medida, envolvidos na calibração, através de informações retiradas dos catálogos dos fabricantes dos equipamentos. A incerteza na calibração do SADT é definida como a incerteza na calibração dos canais de temperatura e a incerteza nas correções médias por canal de temperatura. Aplicando-se o critério de Kline e McIntock, tem-se:

$$\Delta_{SADT}^2 = \Delta_{Cal}^2 + \Delta_{Cor}^2 \quad (3.1)$$

Onde,

Δ_{SADT} → incerteza na calibração do SADT

Δ_{Cal} → incerteza na calibração dos canais de temperatura

Δ_{Cor} → incerteza nas correções médias por canal de temperatura

A incerteza na calibração dos canais de temperatura foi tomada como sendo a incerteza na medida da temperatura pelos componentes do SADT e a incerteza associada ao termômetro digital:

$$\Delta_{Cal}^2 = \Delta_T^2 + \Delta_{Td}^2 \quad (3.2)$$

Onde,

Δ_T → incerteza na medida da temperatura pelos componentes do SADT;

Δ_{Td} → incerteza associada ao termômetro digital.

A incerteza na medida da temperatura pelos componentes do SADT está relacionada com a incerteza dos termopares de Chromel-Alumel, incluindo o termopar de referência, com a incerteza dos circuitos eletrônicos amplificadores dos sinais dos termopares e com a incerteza do conversor de Analógico-Digital:

$$\Delta_T^2 = \Delta_{Tp}^2 + \Delta_{Amp}^2 + \Delta_{Ad}^2 \quad (3.3)$$

Onde,

Δ_{Tp} → incerteza dos termopares de Chromel-Alumel;

Δ_{Amp} → incerteza dos circuitos eletrônicos amplificadores;

Δ_{Ad} → incerteza do conversor Analógico-Digital.

A incerteza dos termopares de Chromel-Alumel será obtida no catálogo do fabricante dos mesmos, para a faixa de temperatura utilizada na calibração. A incerteza dos circuitos eletrônicos amplificadores refere-se à incerteza dos amplificadores AD595CD:1K. A incerteza do conversor Analógico-Digital, segundo o fabricante, será obtida do catálogo ou do manual de instalação. Considerando a sensibilidade do amplificador AD595CD, para a faixa de temperatura utilizada na calibração, pode-se obter a incerteza do conversor AD em graus Kelvin:

Os amplificadores AD595CD amplificam os sinais dos termopares de Chromel-Alumel do SADT, de acordo com o fabricante, segundo a equação

$$AD595_{Out} = (TK_{Fem} + 11) 247,3 \quad (3.4)$$

Onde,

$AD595_{Out}$ → valor do sinal de saída do amplificador em μV

TK_{Fem} → valor do sinal do termopar Chromel-Alumel em μV

A incerteza nas correções médias por canal de temperatura deverá ser considerada como valor médio das diferenças absolutas, entre os valores medidos pelo termômetro digital e os valores medidos pelo SADT. Considerando a sensibilidade de um termopar Chromel-Alumel, para a faixa de temperatura utilizada na calibração do SADT, obtém-se a sensibilidade dos amplificadores AD595CD.

3.1.8 Curva de Calibração de Temperatura de Termopares

As temperaturas adquiridas através dos termopares, que tiveram seus valores ajustados pela curva mostrada na Figura 3.8, de modo a evitar informação incorreta de temperatura, na análise do sistema. Para cálculo das incertezas de medições, encontra-se em apêndice A, a teoria básica sobre o assunto.

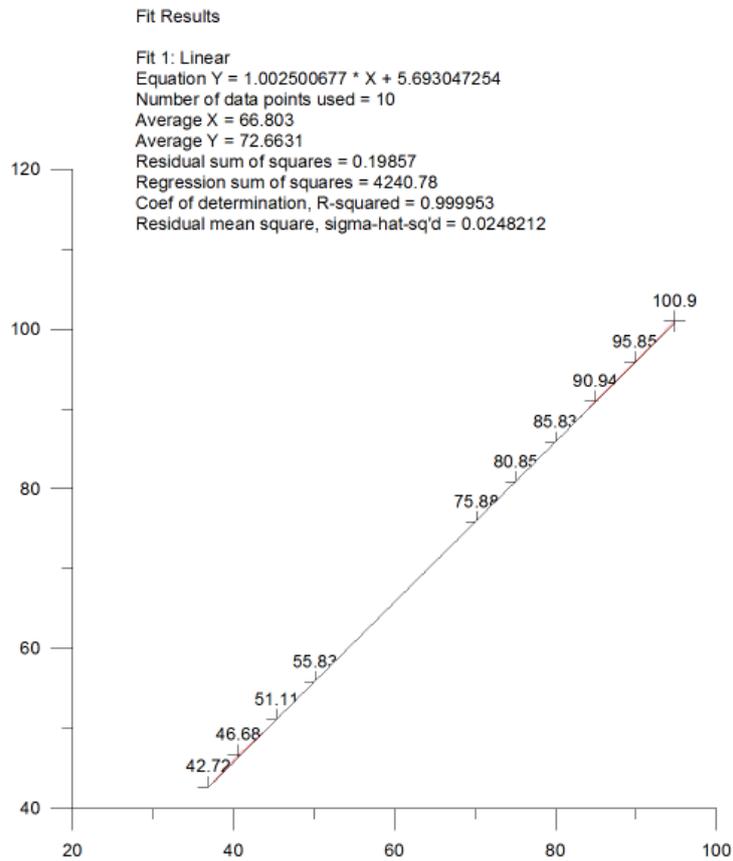


Figura 3.8: Curva de Ajuste de Temperaturas de Termopares

3.2 Operação do Circuito de Circulação Natural - CCN

3.2.1 Inicialização do Experimento

Para inicialização do experimento o computador do sistema de controle e aquisição de dados é ligado através da rede elétrica estabilizada. Na área de trabalho do monitor aciona-se o ícone referente ao Sistema Supervisório para a abertura da

tela de aquisição do Circuito de Circulação Natural.

Para monitoração elétrica do sistema são ligados quatro medidores elétricos. Um voltímetro é ligado para medição de tensão do barramento de conexão dos resistores elétricos instalados no aquecedor. Um outro voltímetro é ligado para medição de tensão de entrada do controlador de potência. Outro voltímetro é ligado para medição da tensão de controle enviada pela placa controladora do computador ao controlador de potência do sistema. Um amperímetro é ligado para medição da corrente elétrica consumida pelos resistores elétricos.

Para ligação do controlador de potência é executado o acionamento de disjuntor tripolar de proteção. Para a inicialização do controle de potência, um valor de potência é ajustado em uma posição ligeiramente acima do zero. Para a continuidade do procedimento, coloca-se o sistema pronto para a operação em automático. Ajusta-se um novo valor de potência, agora para uma condição de valor máximo.

Para ligação do medidor de vazão eletromagnético é acionada uma chave, que encontra-se instalada na caixa de transformação de tensão do medidor, para alimentação do mesmo em 24 V. Observa-se no mostrador do medidor a varredura interna para configuração da medição.

O medidor de vazão ultrassônico Doppler é energizado através de interruptor próprio, que encontra-se instalado na sala de controle. Após a energização, procede-se à configuração dos valores, parâmetros e unidades de medição, compatíveis com o experimento.

Para supervisão do nível d'água do tanque de expansão é ligada uma fonte de tensão em corrente contínua, que habilita um alarme de nível no sistema supervisorio.

Na tela de aquisição do sistema supervisorio é iniciado o procedimento de aquisição de dados, acionando-se o botão de ligação. Após esta operação, a seta de início de aquisição e controle é acionada, posicionada no canto superior esquerdo na tela. Uma nova tela é aberta para nomear o arquivo de dados obtidos pelas aquisições do sistema. Os dados serão salvados automaticamente com a execução do experimento.

Para o ajuste de potência a ser fornecida aos resistores elétricos do aquecedor

deve ser ajustado um valor de tensão de controle no supervisório no local relativo à potência. Antes deste ajuste, é aconselhável aguardar a estabilização das temperaturas ao longo dos circuitos primário e secundário, por cerca de 30 minutos, para proporcionar a minimização de erros na aquisição dos valores de temperaturas no experimento.

Os valores adquiridos pelo Sistema de Controle e Aquisição de Dados são armazenados em planilhas eletrônicas, contendo os valores de temperaturas dos termopares, valores de vazões de circulação natural na perna quente, valores de vazões de circulação natural na perna fria e valores de tensão de controle relativos às potências elétricas fornecidas ao aquecedor ao longo da realização do experimento.

Uma visão geral das seções descritas e dos elementos de medições e controle podem ser identificados na Figura 3.9.

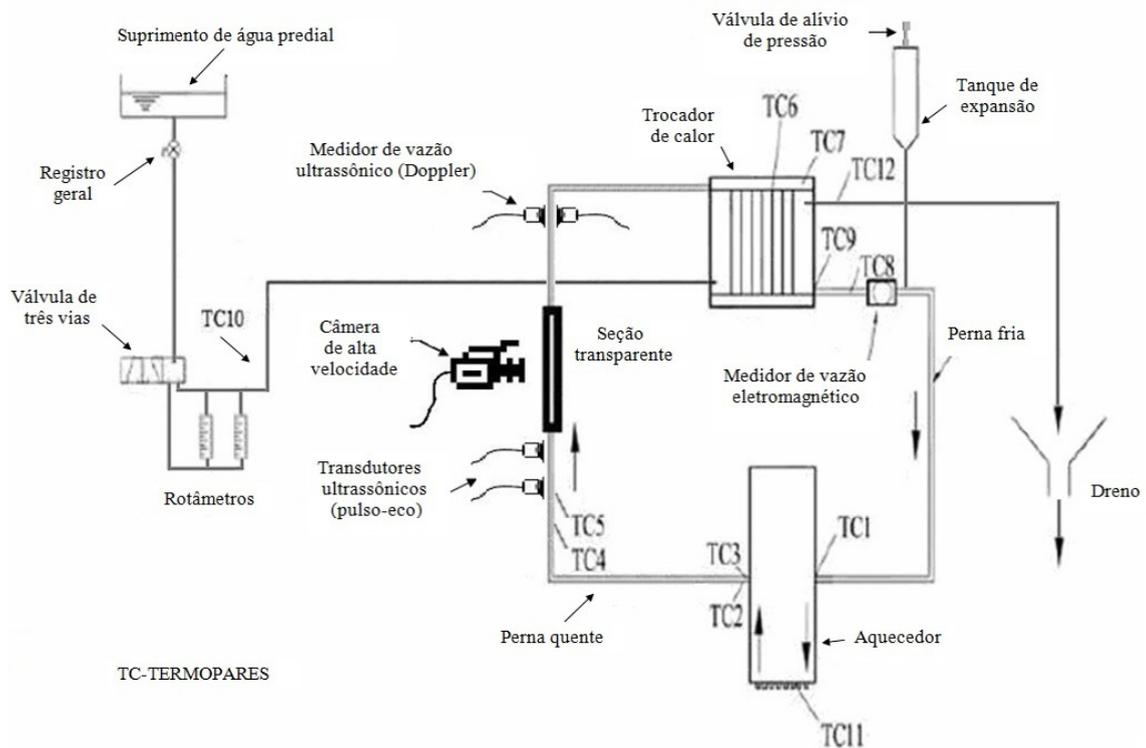


Figura 3.9: Esquemático do Circuito de Circulação Natural - CCN

3.2.2 Sistema de Aquisição e Controle de Dados

O Sistema de Aquisição e Controle de Dados recebe informações, da placa de aquisição e filtragem de sinais dos termopares, do medidor de vazão ultrassônico Doppler, do medidor de vazão eletromagnético e do sensor de nível ultrassônico. O equipamento de aquisição e controle de dados é constituído por microprocessador, placa de controle e de aquisição e placa de controle de temperatura. Este equipamento, denominado SCXI, é composto pelas unidades SCXI Terminal Blocks e SCXI Module, de fabricação National Instruments, conforme mostrado na Figura 3.10.



Figura 3.10: Sistema de Aquisição e Controle de Dados

3.2.3 Interface Gráfica do Sistema de Aquisição e Controle de Dados

A interface gráfica do computador tem todos os controles necessários para ajuste de potência fornecida ao aquecedor e visualização, através de um display para as temperaturas TC1 a TC6, outro display para as temperaturas TC7 a TC12, além

de um display de multi-resolução para visualização das vazões de circulação natural nas pernas quente e fria. Encontra-se já disponível outro display para visualização de informações de pressões nas pernas quente e fria, que passará a funcionar com a instalação futura de sensores de ultra-baixa pressão, conforme pode ser visto na Figura 3.11.



Figura 3.11: Módulo de interface gráfica do sistema de medição e controle

3.2.4 Sistema de Aquisição de Sinais dos Termopares

O sistema de aquisição de dados de temperaturas recebe informações elétricas de termopares com relação às temperaturas TC1 a TC12. Os valores analógicos referentes às temperaturas recebem as informações enviadas pelos termopares, que são recebidas pela placa de aquisição de dados, onde um elemento concentrador de dados executa a filtragem de ruídos e a conversão analógica para digital dos sinais recebidos. O sinal resultante é então processado na placa de aquisição do PXI. A placa de aquisição dos sinais dos termopares é mostrada na Figura 3.12.

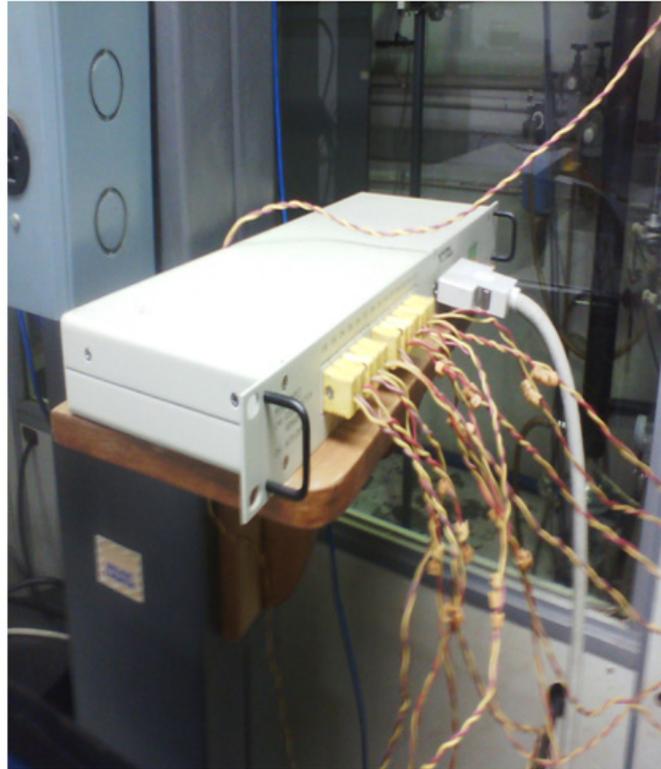


Figura 3.12: Placa de aquisição de sinais dos termopares

3.2.5 Operação de Controle de Potência

O sistema de aquecimento e controle de potência (SACP) de geração de energia inclui a alimentação de energia em 55 VAC, através de transformador monofásico de 127/55 V. O transformador é, por sua vez, alimentado pelo controlador de potência. Este controlador é alimentado por tensão monofásica de 127 VAC, recebe informações de 0-5 V da placa de controle do sistema de aquisição e controle de dados, sendo este valor mostrado na interface gráfica do computador. O funcionamento do sistema mantém a potência elétrica estável nos valores pré-ajustados desejados.

Um controlador de potência elétrica garante a alimentação do feixe de aquecimento, com potência elétrica mantida constante no valor escolhido para a execução do experimento. Para cada tipo de experimento o valor de potência fornecida é ajustado para execução de controle automático pelo controlador de potência. Este valor ajustado é digitado no sistema supervisor utilizado como interface de comando e controle do aquecedor.

Cada valor de potência elétrica é comparado com a medição da tensão elétrica fornecida e a corrente elétrica demandada pelos resistores elétricos, como forma de identificação dos desvios de valores de medição. Estes valores são utilizados para o cálculo adequado da potência aplicada.

3.2.6 Sistema de Aquisição de Temperatura por Termopares

As medições de temperaturas do circuito termo-hidráulico são executadas por doze termopares do tipo K, conforme mostrado na Figura 3.13, que tem como função a medição de temperatura nas regiões de fluido e parede. O termopar TC1 mede a temperatura do fluido no downcomer. O termopar TC2 mede a temperatura de parede na região correspondente à saída do aquecedor e entrada da perna quente. O termopar TC3 mede a temperatura do fluido na região correspondente à saída do aquecedor e entrada da perna quente.

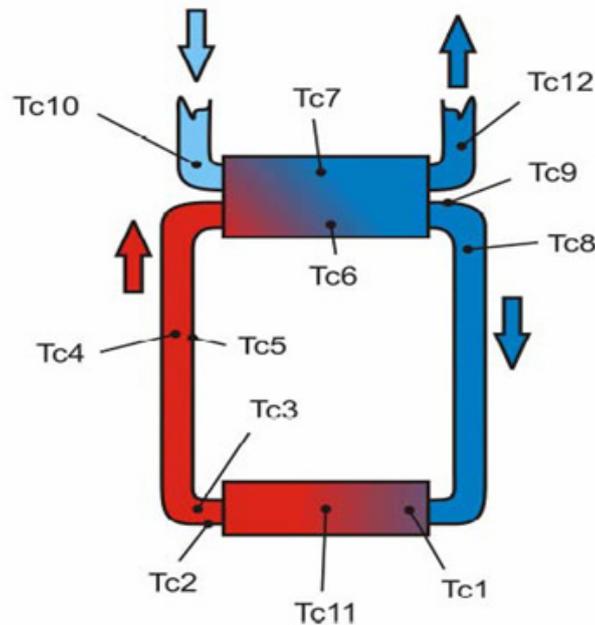


Figura 3.13: Posições dos Termopares

O termopar TC4 mede a temperatura do fluido na região correspondente à 1/3 do comprimento da perna quente. O termopar TC5 mede a temperatura da parede na região correspondente à 1/3 do comprimento da perna quente. O termopar TC6

mede a temperatura do fluido primário, que circula na tubulação, no interior do trocador de calor. O termopar TC7 mede a temperatura da parede da tubulação, no interior do trocador de calor, correspondendo à temperatura na interface entre exterior da parede da tubulação do fluido primário e o fluido secundário, próximo à parede da tubulação. O termopar TC8 mede a temperatura do fluido primário na região correspondente à saída do trocador de calor e a entrada da perna fria. O termopar TC9 mede a temperatura da parede na região correspondente à saída do trocador de calor e a entrada da perna fria. O termopar TC10 mede a temperatura do fluido, do sistema secundário, na entrada do trocador de calor. Este termopar foi relocado para a posição próxima ao sistema de by-pass, conforme mostrado na Figura 3.14, de modo a evitar informação incorreta de temperatura, pois este sensor encontrava-se, antes desta mudança, sob a influência da condução de calor da tubulação da perna quente. O termopar TC11 mede a temperatura do fluido primário, no plenum inferior, na região correspondente à entrada do aquecedor. O termopar TC12 mede a temperatura do fluido secundário, na região correspondente à saída do trocador de calor.

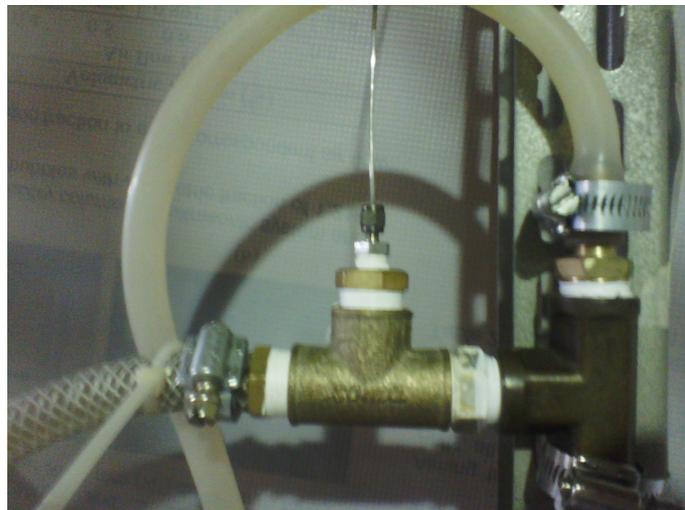


Figura 3.14: Mudança de Posição - TC 10

3.2.7 Medição de Vazão de Circulação Natural

O medidor de vazão eletromagnético, proporcional à tensão induzida, é próprio para medição volumétrica de líquidos, bidirecional, de fabricação Endress+Hauser, com alimentação na tensão de 24 V, configurável para rearme de totalização, supressão de valor medido, rearme em mensagem de erro, na faixa típica de velocidade de 0,01 a 10 m/s, com isolamento galvânica de 5000 ohms, disponível para conexões com protocolo Profibus, sendo utilizado em nosso experimento para executar a medição de vazão de circulação natural na perna fria. Devido à redução de área local do medidor de vazão eletromagnético, com diâmetro aproximadamente igual ao diâmetro da perna fria, além de sua função de medição, este equipamento também contribui para satisfazer ao critério de similaridade, bem como ao fator de fricção global.

3.2.8 Procedimento de Gravação e Reprodução de Imagem

O processo de aquisição de imagens, utilizando o software Ref. Olympus da câmera de alta velocidade, engloba diversos passos que devem ser seguidos para a realização dos eventos, a começar pela exploração dos arquivos através do Archive Browser, gravação de imagem, execução de download para o computador, manipulação das imagens no Strip View, para visualização as imagens em relação aos frames, processamento e análise de imagens no View Working.

Para início de gravação de imagem deve-se atuar o botão Acquire ou o botão Add a Camera, quando apenas uma câmera estiver conectada e uma janela será exibida para digitação do IP da câmera, que no caso da câmera utilizada nos experimentos corresponde ao número 192.168.0.54 Este endereço de IP pode ser obtido em Home/Config/Ethernet na tela de menu na CDU. O dispositivo CDU é um acessório utilizado para controle remoto, podendo ser acoplado diretamente à câmera. O botão Add All Cameras deve ser utilizado, quando o sistema de aquisição estiver conectado a mais de uma câmera. A relação de câmeras abertas será listada na coluna à esquerda da janela de aquisição Acquire Window. A câmera pode ser exibida no lado esquerdo e a introdução dos parâmetros de registro no painel de controle na parte inferior direita.

Para obtenção de atalho para execução de gravação deve-se clicar no botão Camera Set, que possibilita o ajuste de câmera(s) para gravação, através da ferramenta de atalho Set Camera to Record Mode. Para interrupção da gravação com a manutenção do vídeo gravado deve-se atuar Stop a Recording. Para interrupção da gravação e o descarte do vídeo gravado deve-se atuar em Abort a Recording.

Para início de abertura de arquivo de imagem deve-se atuar o botão Archive Browser e utilizar a barra de rolagem no lado esquerdo do navegador. A seguir, deve ser escolhido o vídeo de preferência. Atuar no botão do lado direito da janela e selecionar o botão Open within Strip View. Uma outra forma de ação, é clicar duas vezes sobre a imagem.

Para selecionar a região em que o evento de interesse ocorreu, clicar e arrastar o mouse sobre a faixa, destacando o tempo de interesse. A seguir, clicar com o botão do lado direito da área em destaque. O Strip View acionará, automaticamente, o zoom e também o centro da faixa na região selecionada. Após isolar o evento de interesse e incluir o evento no tempo, mover a imagem para o Working View. A seguir, acionar o botão do lado direito do mouse dentro da faixa e selecionar Strip Functions. Em seguida, selecionar Open in Working View, ou simplesmente, clicar duas vezes dentro da faixa.

As imagens que aparecem na janela do Working View podem ser analisadas utilizando-se o conjunto de ferramentas, existente na área de navegação no topo do painel de controle, que estão localizadas à direita da imagem do vídeo. Para a adequada manipulação do vídeo utilizar o botão Playback. Para acionamento de visualização rápida utilizar o botão Playback Quick View Slider. Para ajuste do número de frames e tempo de visualização deve-se utilizar o botão Time and Frame numbers. Para o adequado controle do ajuste de número de frames e tempo de visualização utilizar o botão Loop Control. Para interligação de projetos deve-se utilizar o botão Link projects. Para visualização do vídeo em tamanho ampliado utilizar o botão Zoom. Para controle de deslocamentos nos eixos de direção utilizar o botão Pan. Para visualização do vídeo em tamanho real utilizar o botão View Actual Size. Para ajuste de gráfico na tela utilizar o botão Fit Graph in Window. Para ajuste de imagem na tela utilizar o botão Fit Image in Window.

Ao utilizar o botão Play são abertas caixas de diálogo, onde na caixa Controls podem ser definidos, tanto o ajuste do frame inicial quanto o ajuste de vários marcadores. Com a atuação da caixa Add Bookmark pode-se adicionar marcadores, remover marcadores, voltar ao marcador anterior e ir ao marcador posterior. Com a atuação do botão Playback Rate são definidos os valores de velocidade de reprodução de número de quadros por segundo, controle deslizante no intervalo de lento a rápido e a velocidade de avanço. O tempo atual, frame atual, velocidade de gravação, tempo de exposição e frequência de dados, são definidos na caixa Information. Ajustar as faixas em branco para modificar a região de interesse.

O botão Process ao ser atuado permite a abertura de caixas de diálogo. Na caixa Brightness pode ser definido o ajuste de brilho. Na caixa Contrast é possível ajustar o contraste de cores. A correção de matizes de cores pode ser executado na caixa Gamma Correction. Para modificar a aparência da imagem até que as características de interesse fiquem mais pronunciadas pode-se atuar a caixa Non-linear. Pode-se também tentar melhorar a aparência da imagem, utilizando a configuração em Image Filter.

O botão Calibrate são abertas caixas de diálogo. Na caixa Normal pode ser selecionado o modo normal de calibração. Encontrar um recurso dentro do vídeo que tenha um tamanho conhecido. Atuar no retículo de um lado da característica conhecida. Usar o botão Set Point 1. Atuar no retículo do outro lado da característica conhecida e no botão Set Point 2. Introduzir o valor da distância entre os dois pontos e as unidades de medida. Atuar no botão Apply ».

No botão Analyse são abertas caixas de diálogo. Atuar o botão Start para ativar os recursos de análise. Na caixa Tracking pode ser selecionado o modo manual ou automático de calibração. Na caixa Features and Measurements, escolher Feature 1 como recurso de auto-track de interesse. Utilizar o botão Define Region. O recurso é marcado com um X na linha em branco (cor do marcador foi alterado de vermelho para branco). Acesse a cor e edite diálogo, clicando duas vezes no marcador sob o M da coluna. No vídeo, desenhar uma caixa em torno da característica de interesse. Usar o botão Track. A Suite de Software i-SPEED vai rastrear a característica de interesse. Na conclusão do rastreamento, clicar no botão Stop. Definir as unidades

desejadas. Ao utilizar o botão Export, se você quiser exportar os dados de análise de movimento. Selecionar um formato de exportação da caixa drop-down localizada ao lado do botão Export.

No botão Graph são abertas caixas de diálogo. Pesquisando em Graph Settings selecione no canto superior direito o marcador Show Analysis. Selecionar o recurso de características do canal de gráficos, a partir da lista de canais à esquerda, em Displayed Channels. Mover estas características do painel à esquerda Not Displayed para o painel da direita Displayed. Atuar o botão Update Graph. O gráfico agora é exibido com a análise do movimento resultante.

Ao usar o botão Comment são abertas caixas de diálogo. Na caixa Video Comments mover um quadro na seqüência de vídeo. Digitar um comentário em vídeo. Na caixa Global Comments digitar um comentário. Avançar para outro quadro na seqüência de vídeo. Digitar um comentário do segundo vídeo.

3.3 Processamento de Imagem pelo Aplicativo em MatLab

O processamento e análise de imagens obtidas com a técnica de filmagem com câmera de alta velocidade foi elaborado, através de um aplicativo desenvolvido no Laboratório de Termohidráulica Experimental (LTE/IEN/CNEN), com base e suporte no software MatLab, de modo a possibilitar o procedimento de conversão de imagens gravadas em modo AVI (Audio Video Interleave) para matrizes binárias de colunas de pixels.

O modo AVI é um formato de vídeo e áudio, que encontram-se interligados sem necessidade de codificação, sendo bastante utilizado em computadores pessoais com suporte em base Windows. As imagens são convertidas inicialmente pela correspondência do valor 1 (um) para imagens em branco e do valor 0 (zero) para imagens em preto. As imagens em branco passam a identificar o domínio da região da bolha (vapor) e as imagens em preto identificam o domínio do restante da imagem que não corresponde à bolha. Em nosso processamento o restante da imagem corresponde à região de líquido (água).

O software permite a identificação da imagem de maior comprimento no quadro de filmagem (frame), em nosso caso a bolha, para a adequada análise a partir da utilização de método matricial no processamento de imagem. Com o comprimento da imagem calculado e a captura de seu trajeto pelo quadro de filmagem, torna-se possível o cálculo da velocidade de propagação do objeto, no caso a bolha.

Para processamento em multi-resolução foi utilizado o aplicativo em MatLab, conforme mostrado na Figura 3.15.

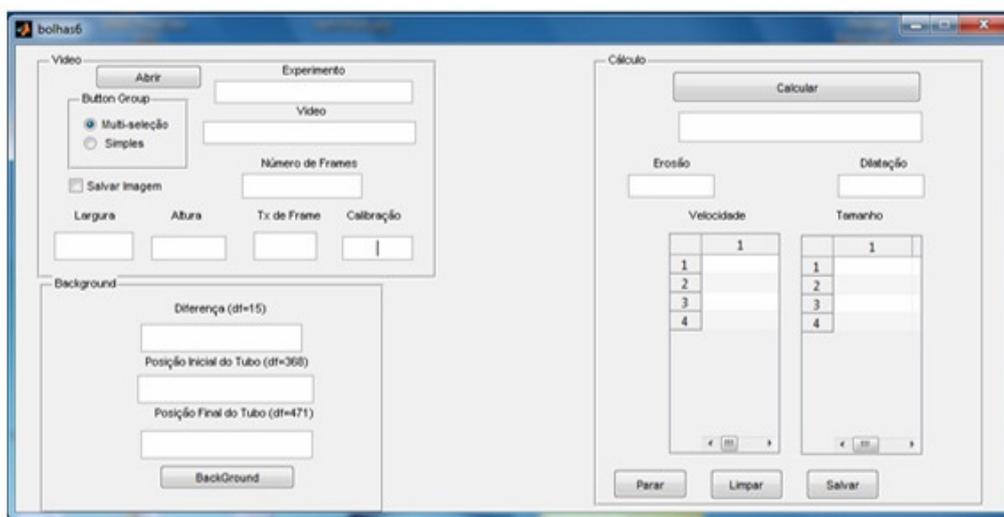


Figura 3.15: Aplicativo para Processamento de Imagem

Para a análise de imagem atuar o botão Analyse e começar selecionando-se o botão Pixels na caixa Units, marcando a posição inicial e final do tubo, escolhendo um ponto na imagem da parede do tubo, atuando o botão Select Point na cor vermelho do lado esquerdo, escolhendo outro ponto na imagem na parede do tubo, atuando novamente o botão Select Point, selecionando na cor vermelho do lado direito, sendo estas distâncias as que serão utilizadas para X,Y-Position, no número 1, referente à posição inicial do tubo e posição final do tubo.

Os cálculos são executados a partir de calibração do software de aquisição de imagem pelo da câmera de alta velocidade. Esta calibração consiste em converter

as unidades de número de pixels por frame em unidade de distância por tempo.

Para a calibração é necessário abrir o programa de aquisição de imagem e a abertura do arquivo a ser processado, nomeando-o como o primeiro arquivo adicionando-se o número 1 (um) na frente do mesmo. A seguir, deve-se selecionar um vídeo em que haja frame sem bolhas. Para finalizar a calibração deve-se atuar o botão Calibrate, escolhendo-se um ponto de referência junto ao tubo na imagem, atuando-se o botão Set Point #1. Escolhe-se outro ponto da mesma forma que o anterior, atuando-se o botão Set Point #2. A distância entre os dois pontos marcados na sequência anterior, selecionados com a unidade em metros, deve então ser digitado no espaço correspondente à Distance e a seguir atuar o botão Apply. Este será o valor a ser usado na calibração.

Continuando-se com as configurações, deve-se digitar na caixa Background o valor da diferença, e ajustando-se em 15. Para a posição inicial do tubo deve ser selecionado o número de pixels encontrados com o procedimento anterior, na cor vermelha. Para a posição final do tubo deve ser selecionado o número de pixels encontrado com o procedimento anterior, na cor azul.

Para o cálculo da velocidade da bolha pelo processamento da imagem do aplicativo, procede-se à divisão da imagem em 8 (oito) regiões pré-definidas. A identificação da posição da bolha e o intervalo de tempo em que cada bolha ultrapassa cada uma destas regiões, garante que só sejam considerados eventos da passagem da bolha por pelo menos 5 (cinco) das regiões definidas. Este procedimento de identificação garante a aquisição de dados com a bolha passando ao longo de todo o comprimento do trajeto da bolha, em nosso caso, a tubulação da perna quente.

A velocidade terminal de cada bolha é calculada a partir do coeficiente angular da reta definida pela relação linear entre a posição da bolha e o intervalo de tempo.

Para o início do processamento da imagem, deve-se abrir a pasta referente ao aplicativo de processamento em MatLab, escolhendo o arquivo nomeado de 6.m, quando então o programa será inicializado a partir da tela onde encontra-se os botões run e video, passando-se a preencher os dados da calibração executados. O início compreende ainda, o preenchimento do nome desejado para o arquivo de dados do experimento, quando no final do processamento o programa irá gerar uma planilha

com este nome. Para a calibração deve-se preencher com o número de pixels gerado. A taxa de frame é preenchida com o número de frames ajustado na ocasião da filmagem. A seguir, deve ser selecionado o sistema de multi-seleção na caixa Button Group. Se houver necessidade de salvar imagem geradas no processamento deve-se selecionar a condição de opcional. E finalmente, deve-se abrir e buscar a pasta de vídeos a serem processados.

Os comprimentos das bolhas são calculados, utilizando-se a velocidade de propagação multiplicada pelo intervalo de tempo de permanência de bolhas dispersas, em cada uma das regiões. Para tal, atua-se o botão Calculate, digitando 2 (dois) na caixa Erosão e também 2 (dois) na caixa Dilatação, após atuar o botão Background, verifica-se se o programa foi aberto corretamente. Em caso positivo, atua-se o botão Calculate e aguarda-se o programa rodar, quando então será gerada a planilha com os resultados. Enquanto o programa estiver rodando não deve ser aberta a planilha.

O aplicativo armazena os valores calculados em planilha eletrônica com extensão do tipo xls.

3.4 Técnica de Medição Ultrassônica

Para aquisição de dados por técnica ultrassônica será utilizado transdutor ultrassônico de fab. Panametrics, do tipo duplo cristal de 10 MHz e 12,5 mm de diâmetro, modelo 2200, com terminal soldado e cabos de transmissão de sinais, que são conectados à placa de aquisição de sinais ultrassônicos e ao sistema supervisorio instalado em computador.

3.4.1 Aquisição de Sinais Ultrassônicos

O Sistema de Aquisição de Sinais Ultrassônicos tem como função gerar a tensão de excitação dos transdutores ultrassônicos, para geração de onda ultrassônica, que terá o trajeto na passagem pela parede do tubo transparente e pelo meio líquido. A placa de geração e aquisição de sinal ultrassônico, encontra-se acoplada a uma interface gráfica, que através de um sistema supervisorio possibilita executar os

ajustes necessários, tais como: off-set, filtro passa-alta, filtro passa-baixa, taxa de amostragem, tensão do pulso, modo pulso-eco ou modo transmissão, comprimento do buffer e ganho. Estes ajustes permitem o adequado enquadramento da reflexão do sinal ultrassônico para aquisição das tensões dos pulsos. Este sistema permite a gravação dos sinais adquiridos em planilha eletrônica de dados.

3.4.2 Processamento de Sinais Ultrassônicos

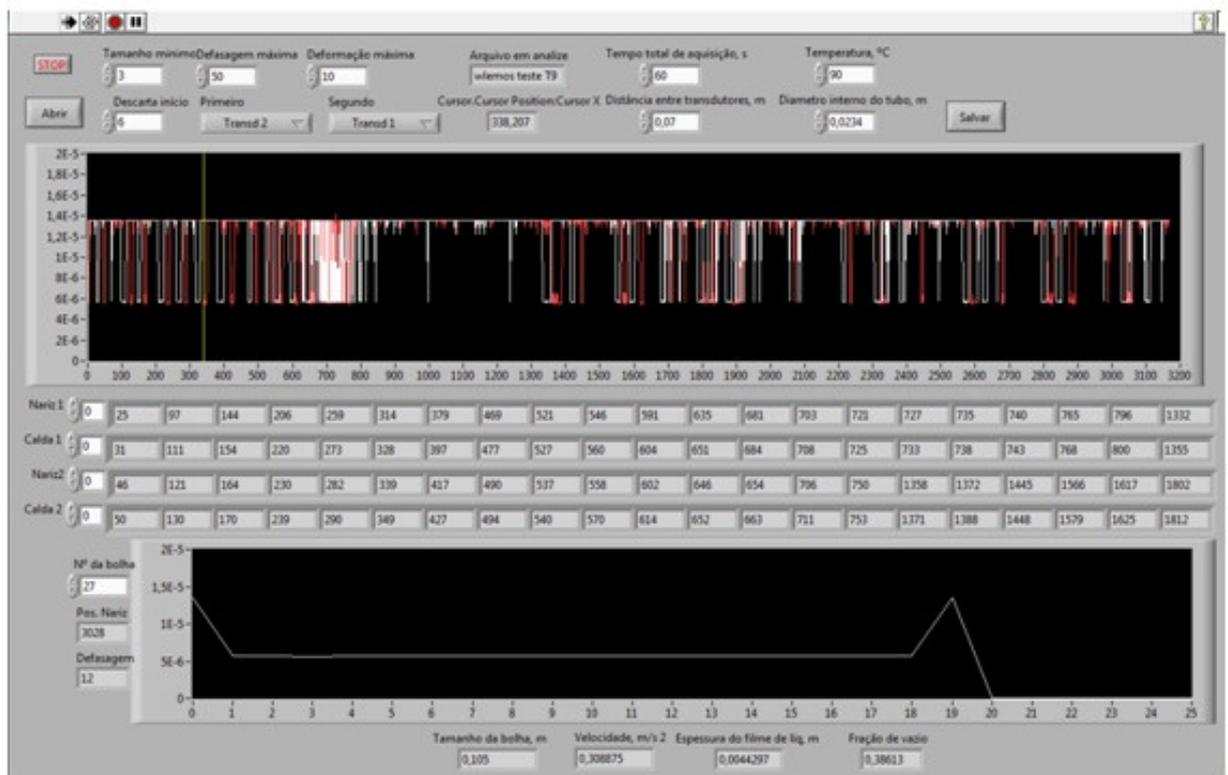


Figura 3.16: Aplicativo para Processamento de Sinais Ultrassônicos

Os perfis de bolhas estão mostrados da Figura 3.17 a Figura 3.26 referem-se aos sinais ultrassônicos processados, a partir da entrada de dados constantes de planilha eletrônica de sinais ultrassônicos, arquivada pelo Sistema de Aquisição de Sinais Ultrassônicos, onde podem ser vistos os perfis de bolhas decorrentes da atenuação de sinais dos transdutores na interface líquido-vapor.

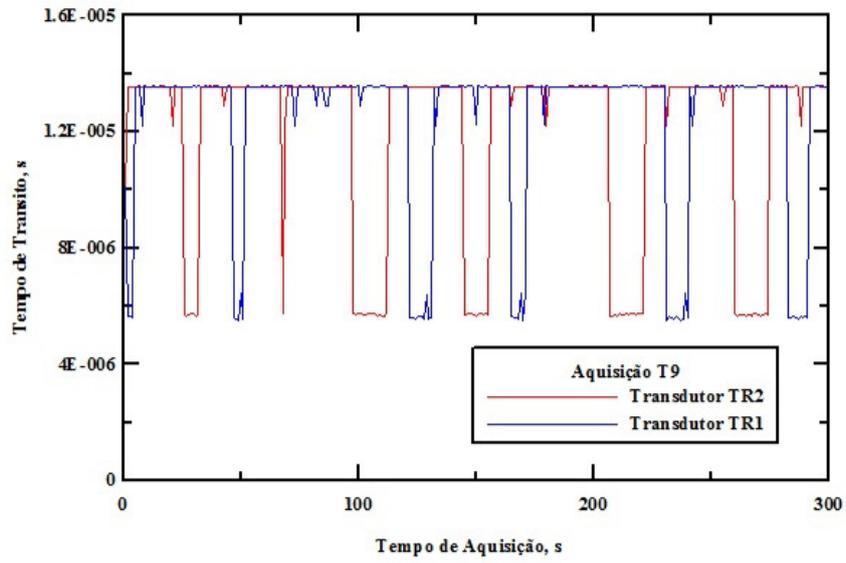


Figura 3.17: Perfil de bolhas - 0-300 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

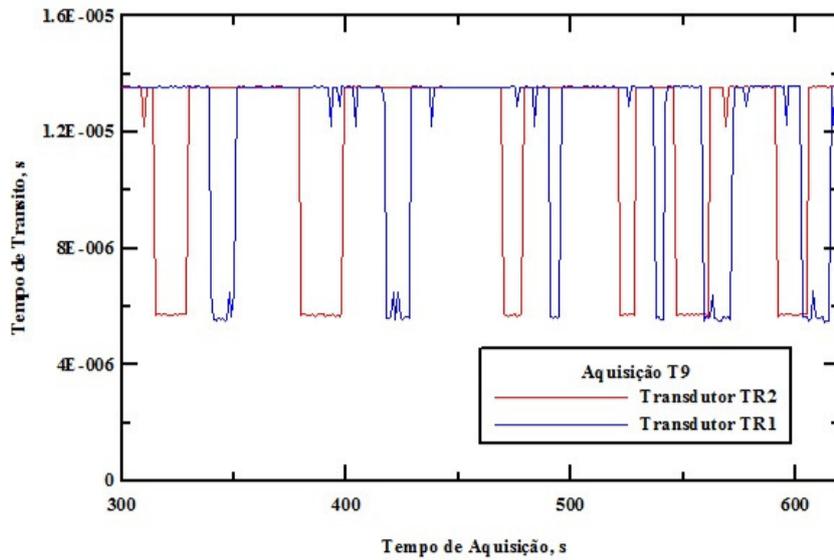


Figura 3.18: Perfil de bolhas - 300-620 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

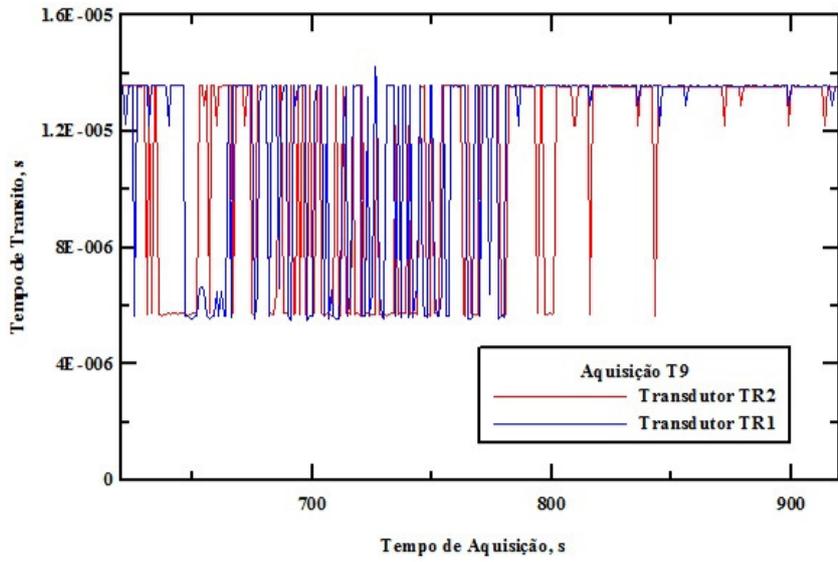


Figura 3.19: Perfil de bolhas - 620-920 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

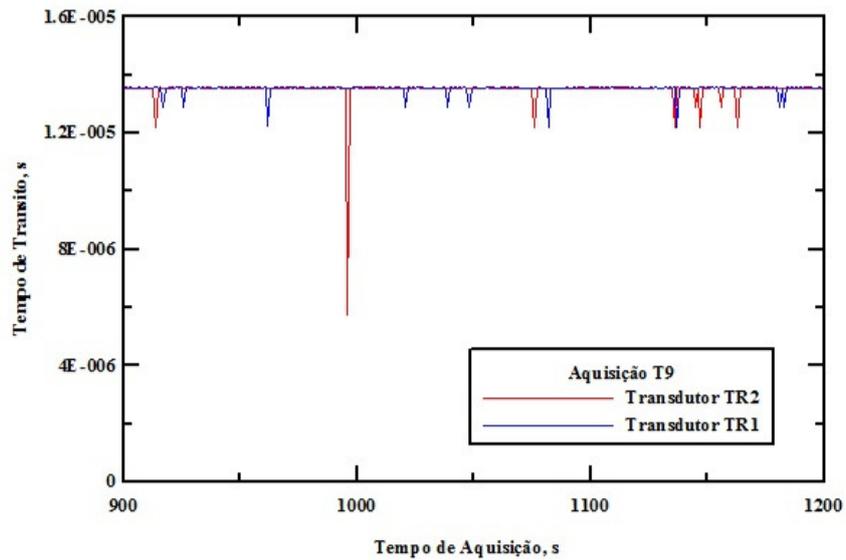


Figura 3.20: Perfil de bolhas - 900-1200 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

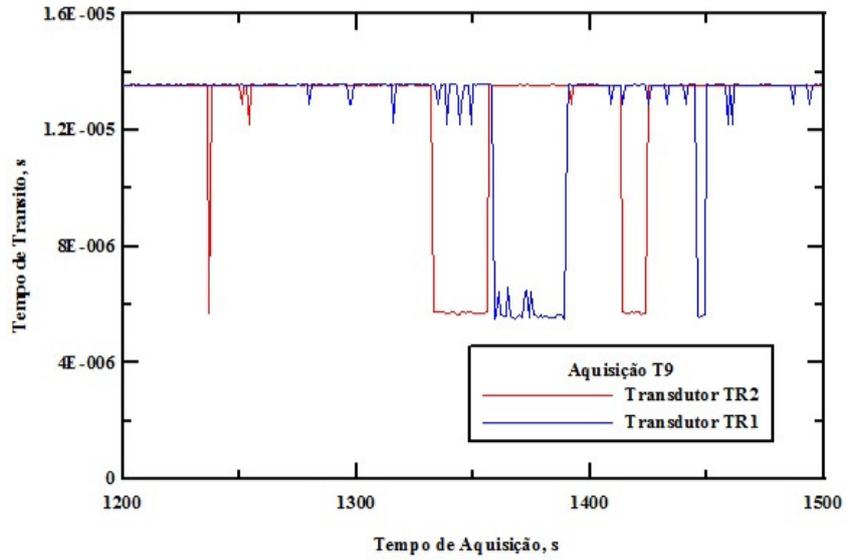


Figura 3.21: Perfil de bolhas - 1200-1500 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

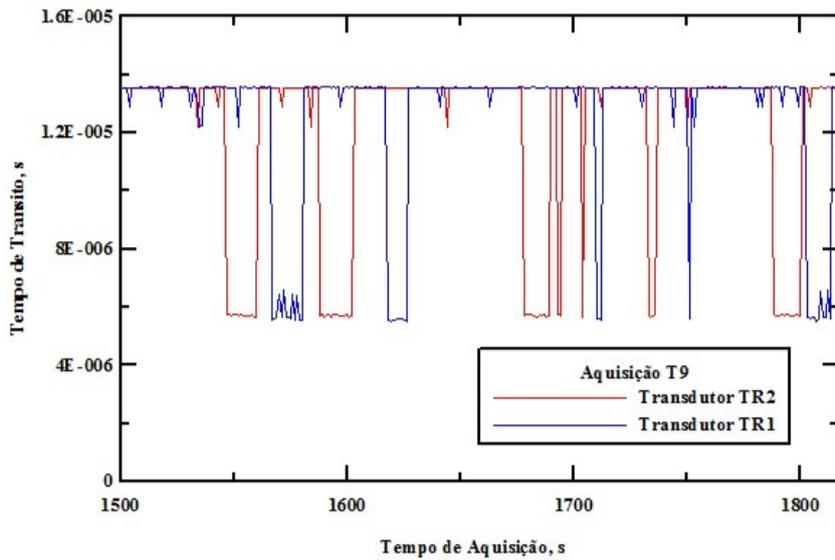


Figura 3.22: Perfil de bolhas - 1500-1817 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

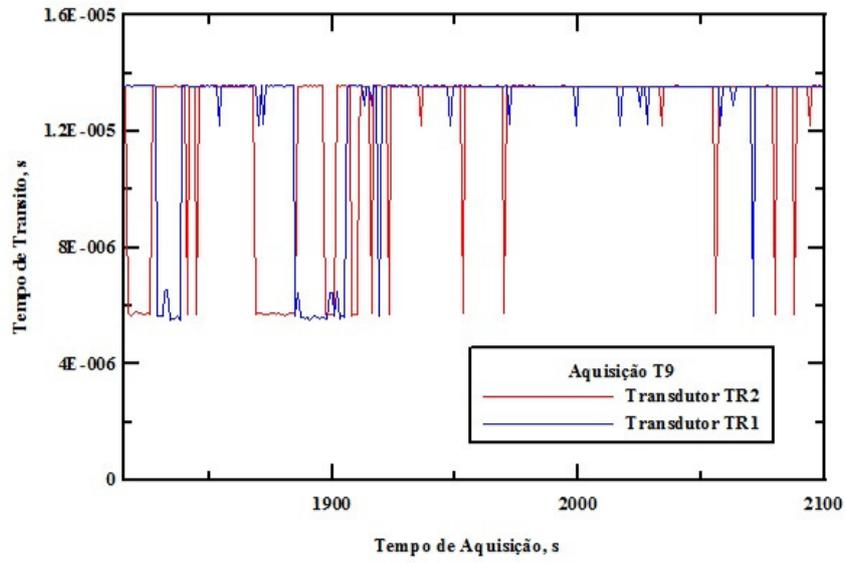


Figura 3.23: Perfil de bolhas - 1815-2100 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

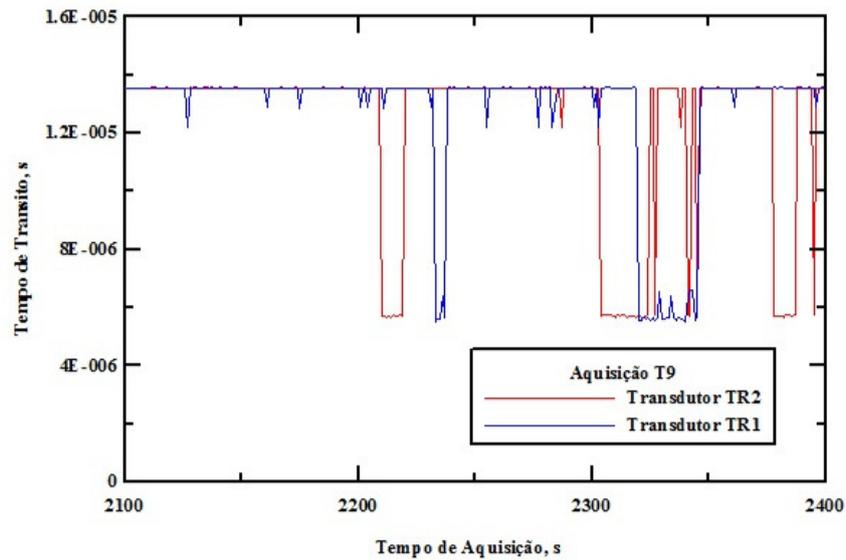


Figura 3.24: Perfil de bolhas - 2100-2400 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

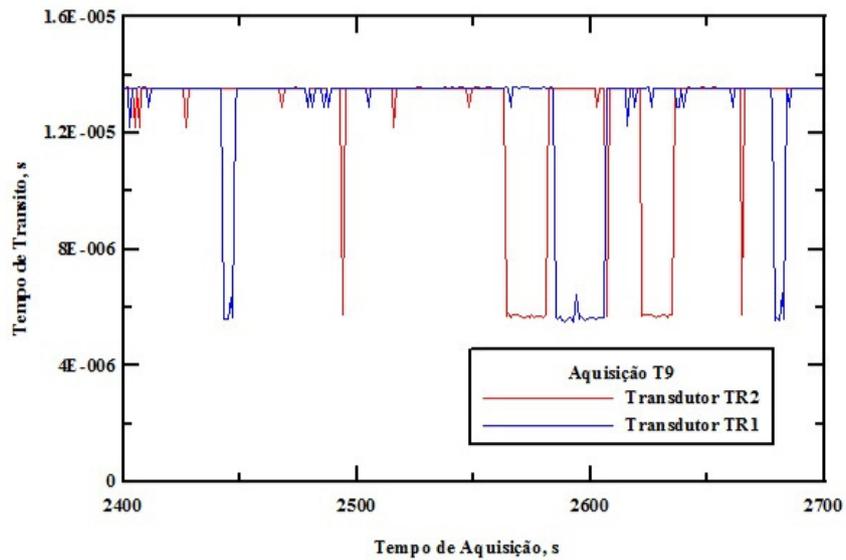


Figura 3.25: Perfil de bolhas - 2400-2700 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

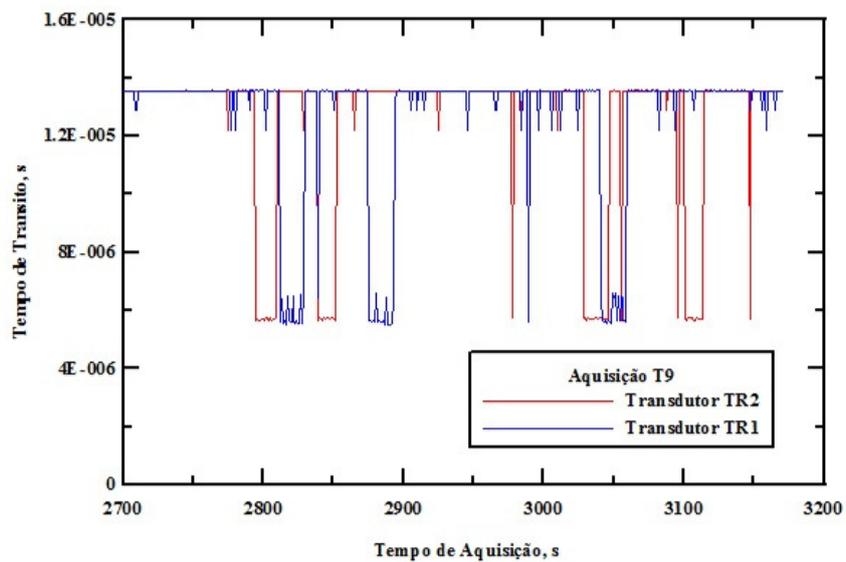


Figura 3.26: Perfil de bolhas - 2700-3200 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

3.4.3 Cálculo de Parâmetros Bifásicos por Técnica Ultrassônica Tipo Pulso-eco

O dimensionamento de parâmetros bifásicos, a partir de aquisições e processamento de sinais ultrassônicos, quando são fornecidos números de aquisições de sinais ultrassônicos, tempos de trânsito de onda ultrassônica e perfil de bolhas. O objetivo é estimar comprimento de bolha, velocidade de bolha e fração de vazio. Com o conhecimento da fração de vazio e a velocidade de fase de vapor, também é possível determinar a velocidade superficial de vapor.

Cálculo de Velocidade de Bolha

O cálculo da velocidade de uma bolha ascendente na perna quente, leva em conta tanto o espaçamento entre os dois transdutores ultrassônicos, quanto o intervalo entre as aquisições N_{an2} e N_{an1} , dos sinais refletidos pela interface líquido-vapor.

$$N_{aqv} = N_{an2} - N_{an1} \quad (3.5)$$

A distância d percorrida neste intervalo de tempo, corresponde ao espaçamento entre os transdutores. As aquisições através de dos transdutores devem ser transformadas para tempo real t_{vs} , em segundos, conforme Equação 3.6 . O total de aquisições corresponde a N_{taq} . O tempo total de aquisição dos dados é expressa por t_{tas} .

$$t_{vs} = \frac{t_{tas}N_{aqv}}{N_{taq}} \quad (3.6)$$

A velocidade da bolha é calculada pela Equação 3.7, utilizando o valor do intervalo de tempo correspondente à aquisição dos sinais de eco de fundo dos transdutores Tr1 e Tr2, produzidos pela reflexão das ondas ultrassônicas na região da interface entre o líquido e a bolha. O intervalo de tempo t_s corresponde ao tempo gasto pelo nariz da bolha percorrer a distância entre os dois transdutores, que estão espaçados por uma distância "d" conhecida.

$$V_B = \frac{d}{t_{vs}} \quad (3.7)$$

Cálculo de Comprimento de Bolha

Considera-se o intervalo entre a aquisição de sinais de eco de fundo, na passagem da bolha pelo nariz e pela cauda, no mesmo transdutor, conforme Equação 3.8.

$$N_{aql} = N_{ac1} - N_{an1} \quad (3.8)$$

As aquisições através dos transdutores devem ser transformadas para tempo real t_{ls} , em segundos, conforme Equação 3.9.

$$t_{ls} = \frac{t_{tas}N_{aql}}{N_{taq}} \quad (3.9)$$

O comprimento da bolha é então calculado pela Equação 3.10,

$$L_B = V_B t_{ls} \quad (3.10)$$

Cálculo de Comprimento de Nariz, Corpo e Cauda

O aplicativo de processamento de sinais ultrassônicos traça o perfil da bolha e define o comprimento em termos de quantidades de aquisições. Para execução dos cálculos devem-se transformar as aquisições em tempos reais expresso em segundos.

As aquisições através dos transdutores devem ser transformadas para tempo real t_{ns} , em segundos, conforme Equação 3.11.

$$t_{ns} = \frac{t_{tas}N_{aqn}}{N_{taq}} \quad (3.11)$$

O comprimento do nariz corresponde a,

$$L_{nB} = V_B t_{ns} \quad (3.12)$$

As aquisições através dos transdutores devem ser transformadas para tempo real t_{cs} , em segundos, conforme Equação 3.13.

$$t_{cs} = \frac{t_{tas}N_{aqc}}{N_{taq}} \quad (3.13)$$

O comprimento do corpo corresponde a,

$$L_{cB} = V_B t_{cs} \quad (3.14)$$

As aquisições através dos transdutores devem ser transformadas para tempo real t_{ts} , em segundos, conforme Equação 3.15.

$$t_{ts} = \frac{t_{tas} N_{aqt}}{N_{taq}} \quad (3.15)$$

O comprimento da cauda corresponde a,

$$L_{tB} = V_B t_{ts} \quad (3.16)$$

Cálculo do Tempo de Trânsito Médio

Considerando o perfil da bolha do nariz à cauda, tem-se o tempo de trânsito em função das aquisições, conforme a Equação 3.17.

$$t_{tr} = \frac{1}{x^2} \quad (3.17)$$

O comprimento da bolha varia de 0 a n , correspondente ao intervalo das aquisições da passagem da bolha por um dos transdutores. A equação do perfil da bolha é definida na Equação 3.18.

$$A_n = 1 + \int_1^n \frac{dx}{x^2} \quad (3.18)$$

Fazendo as operações de integrações, tem-se

$$A_n = 1 + \int_1^n x^{-2} dx \quad (3.19)$$

$$A_n = 1 + \int_1^n x^{-2} dx = 1 + \left\{ \left[\frac{x^{-2+1}}{-2+1} \right] + c \right\}_1^n \quad (3.20)$$

$$A_n = 1 + \left\{ \left[\frac{x^{-1}}{-1} \right] + c \right\}_1^n \quad (3.21)$$

$$A_n = 1 + \left\{ \left[\frac{n-1}{-1} + c \right] - \left[\frac{1^{-1}}{-1} + c \right] \right\} \quad (3.22)$$

$$A_n = 1 + \left\{ \left[-\frac{1}{n} + c \right] - \left[-\frac{1}{1} + c \right] \right\} \quad (3.23)$$

$$A_n = 1 + \left[-\frac{1}{n} + c + 1 - c \right] = 1 + \left[1 - \frac{1}{n} \right] = 2 - \frac{1}{n} \quad (3.24)$$

$$A_n = 2 - \frac{1}{n} \quad (3.25)$$

O tempo de trânsito médio é expresso por,

$$t_{tr} = \frac{[t_{r1} + t_{r2} + \dots + t_{rn}]}{n} \quad (3.26)$$

Cálculo do Filme de Líquido

Para o cálculo do filme de líquido é utilizado o valor do tempo de trânsito médio. O sinal ultrassônico transita pela sapata de atenuação de temperatura, pela parede do tubo de vidro e pela água, até atingir a interface líquido-vapor. Deve-se calcular os tempos parciais gastos pelo sinal ultrassônico para atravessar todos os meios de propagação.

O tempo de trânsito pela sapata é

$$t_{trs} = \frac{L_{sap}}{V_{som-sap}} \quad (3.27)$$

O tempo de trânsito pelo tubo de vidro, leva em conta a espessura da parede do tubo,

$$t_{trt} = \frac{L_{tub}}{V_{som-vid}} \quad (3.28)$$

O tempo de trânsito pela água corresponde à Equação 3.29, mas o filme de líquido é também uma incógnita.

$$t_{tra} = \frac{L_{ag}}{V_{som-ag}} \quad (3.29)$$

Mas, o tempo de trânsito na água pode ser calculado de outro modo,

$$t_{tra} = \frac{t_{tr}}{2} - (t_{trs} + t_{trt}) \quad (3.30)$$

Com este valor de tempo de trânsito na água, calcula-se o filme de líquido da forma,

$$h_{fl} = L_{ag} = V_{som-ag} t_{tra} \quad (3.31)$$

Cálculo do Volume da Bolha

O cálculo do volume da bolha é obtido pela soma dos volumes do nariz, do corpo e da cauda. O volume do nariz é calculado, considerando-se sua forma como uma calota esférica, de acordo com a Equação 3.33. O termo L_n corresponde ao comprimento do nariz, que foi calculado pela Equação 3.12. O termo r corresponde ao raio da bolha.

O raio da bolha é calculado pela Equação 3.32,

$$r_B = \frac{D_{inttub} - 2h_{fl}}{2} \quad (3.32)$$

O volume do nariz da bolha corresponde ao volume da calota esférica, conforme mostrado na Equação 3.33,

$$Vol_{nariz} = Vol_{calesf} = \frac{1}{3}\pi L_n B^2 (3r_B - L_n B) \quad (3.33)$$

O volume do corpo da bolha pode ser calculado, segundo a Equação 3.34,

$$Vol_{corpo} = \pi r_B^2 L_{cB} \quad (3.34)$$

O volume da cauda é calculado pela Equação 3.35, considerando-se a cauda com ângulo de 45 graus.

$$Vol_{cauda} = \frac{\pi r_B^2 L_{tB}}{2} \quad (3.35)$$

O volume da bolha pode ser escrito conforme Equação 3.36

$$Vol_B = Vol_{nariz} + Vol_{corpo} + Vol_{cauda} \quad (3.36)$$

Cálculo da Fração de Vazio da Bolha

A fração de vazio da bolha corresponde à relação entre o volume da bolha e o volume total na região da bolha, conforme Equação 3.38

Sendo o volume total descrito na forma,

$$Vol_{total} = Vol_B + Vol_{Liq} = \pi R_{inttub}^2 (L_{nB} + L_{cB} + L_{tB}) \quad (3.37)$$

A fração de vazio é então calculada,

$$\alpha_B = \frac{Vol_B}{Vol_{Total}} = \frac{Vol_B}{Vol_B + Vol_{Liq}} \quad (3.38)$$

Cálculo de Fração de Vazio Média

A fração de vazio média corresponde a um valor percentual da fração de vazio da bolha. Este percentual é calculado a partir da relação entre o comprimento da bolha e a distância entre o nariz da bolha e o nariz da bolha posterior, conforme definido na Equação 3.40. O intervalo entre a cauda da bolha e o nariz da bolha posterior é denominado pistão de líquido.

O pistão de líquido pode ser determinado pela Equação 3.39.

$$L_s = \frac{t_{tas} (N_{an2} - N_{ac1})}{N_{taq}} V_{Bpost} \quad (3.39)$$

A fração de vazio média é então calculada,

$$\alpha_{medio} = \alpha_B \frac{L_B}{L_B + L_s} \quad (3.40)$$

Cálculo de Velocidade Superficial de Fase de Vapor

$$V_{SV} = \alpha_B V_B \quad (3.41)$$

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Este trabalho experimental procurou seguir as diretrizes dos relatórios técnicos sobre o projeto, construção e implementação do CCN, quanto ao funcionamento da instalação e aos cuidados necessários sob condições de regime bifásico. Para isso, estabeleceu-se o critério de executar-se os primeiros experimentos com a aplicação de potências baixa, média e alta, até o estágio final de regime monofásico e início da transição para regime bifásico. Esta filosofia de trabalho foi de grande importância, pois agregou conhecimentos relevantes na preparação e operação do circuito experimental.

Os experimentos em regime bifásico foram realizados com combinações de quatro potências e quatro vazões de resfriamento secundário, para investigação de parâmetros interfaciais de comprimentos de bolhas e velocidades de bolhas, os peris de distribuições de comprimentos e velocidades de bolhas, além das correlações entre os comprimentos e as velocidades de bolhas.

Outros resultados e análises estão enquadrados como estudos de casos com condições específicas de potências e técnicas de medições aplicadas. Estes casos visam complementar todo o trabalho de pesquisa com a aplicação das técnicas ultrassônicas e de imagem, através de cálculos de parâmetros interfaciais, que abrangem o cálculo de comprimento e velocidade de bolha, além de fração de vazio. As informações das variáveis responsáveis pelo comportamento do circuito termo-hidráulico do CCN também são estudadas.

Os comportamentos de temperaturas e vazões nas pernas quente e fria são ap-

resentados para confronto com os resultados de experimentos bifásicos, relacionados às quantidades, comprimentos e velocidades de bolhas.

Os perfis de bolhas com as equações de diâmetro de bolhas em função de comprimentos des bolhas, são apresentados confrontados com as imagens de bolhas.

4.1 Experimentos em Regime Monofásico

Os experimentos em regime monofásico foram executados com potências elétricas de 1,1 kW, 0,8 kW e 0,4 kW aplicadas no aquecedor e circulação de vazão de resfriamento secundário ajustada em 6 l/h. Nestes experimentos foram empregadas técnicas de medição de temperaturas e de vazão na perna fria. Nesta etapa do trabalho como ainda não existia a seção transparente na perna quente, a monitoração do circuito foi executada pelo sistema supervisor do Circuito de Circulação Natural através das curvas de temperaturas.

4.1.1 Resultados dos Experimentos com Potência de 0,8 kW

- $Q_s = 6 \text{ l/h}$

O início dos experimentos deu-se com a aplicação de potência elétrica de 0,8 kW, por ser um valor médio em relação à potência máxima de 1,56 kW fornecida pelo feixe de aquecimento do aquecedor. A vazão de resfriamento secundário foi ajustada em 6 l/h.

O primeiro elemento de análise foi a verificação da variações de diferenças de temperaturas do fluido no downcomer e na saída do aquecedor, utilizando-se o gráfico da Figura 4.1. As diferenças de temperaturas, no período dos primeiros 5.000 segundos, permaneceram constantes. A partir daí, foi notada a ocorrência do aumento destas diferenças, de $6^\circ C$ no início do experimento, para de $9^\circ C$ no final. Com estas informações é possível analisar a troca de calor no circuito primário entre entrada e saída no aquecedor.

O gráfico da Figura 4.2 mostra a taxa de remoção de calor através do fluido secundário circulando pelo trocador de calor. Uma curva mostra as temperaturas na entrada do trocador de calor e a outra curva apresenta a evolução das temperaturas

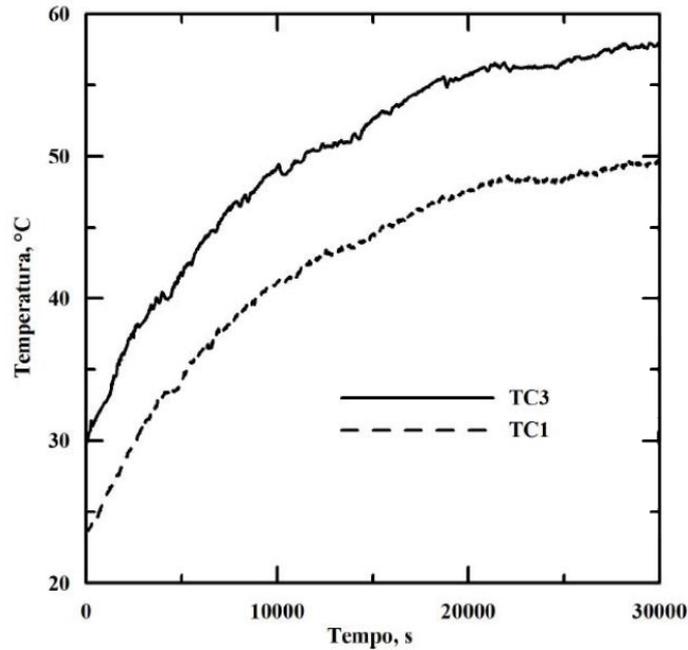


Figura 4.1: Temperaturas no Downcomer e Saída do Aquecedor - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

na saída do trocador de calor. A diferença entre estas temperaturas, inicialmente, é nula, mas no final do experimento o valor desta diferença chega a 23°C .

A Figura 4.3 mostra a evolução das temperaturas no fluido primário e na parede da tubulação na perna quente. O gráfico apresenta as diferenças entre as temperaturas do fluido primário e as temperaturas da parede da tubulação da perna quente. Estas diferenças de temperaturas traduzem a transferência de calor por condução de calor do fluido para a tubulação. No início do experimento a diferença era nula e chegou no final do experimento a 6°C .

A diferença entre as temperaturas do fluido primário no ponto de saída do aquecedor e as temperaturas na entrada da perna quente é aproximadamente nula. Esta diferença mostra que a perda de calor entre estes dois pontos é desprezível em razão da proximidade dos pontos. A figura 4.4 mostra a evolução desta diferença de temperaturas ao longo do tempo.

As temperaturas do fluido na entrada da perna fria e as temperaturas de parede da tubulação da perna fria, apresentam diferenças ao longo do tempo, conforme mostrado na Figura 4.5. No início do experimento a diferença é nula e no final do

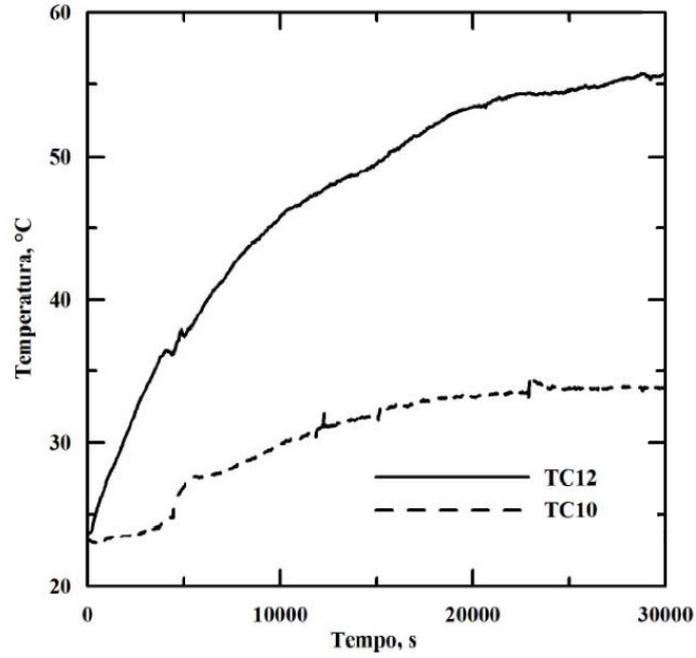


Figura 4.2: Temperatura na Entrada e Saída do Trocador de Calor - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

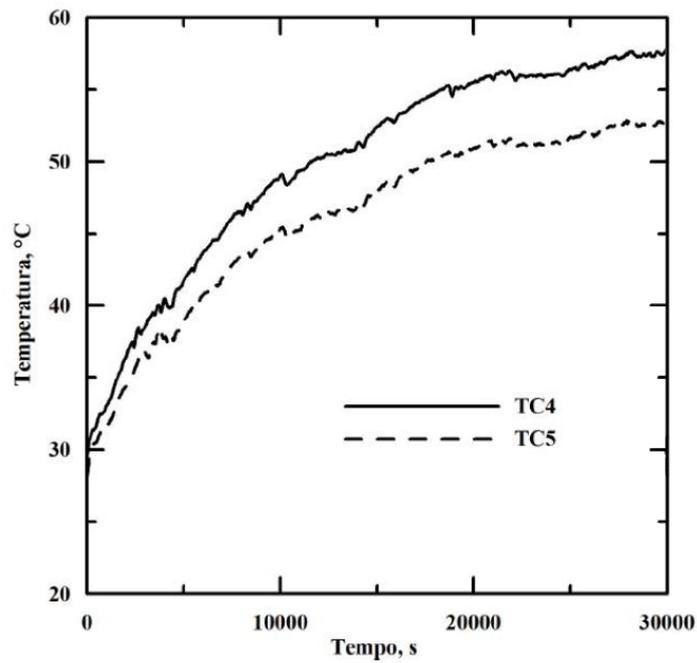


Figura 4.3: Temperatura de Fluido e Parede na Perna Quente - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

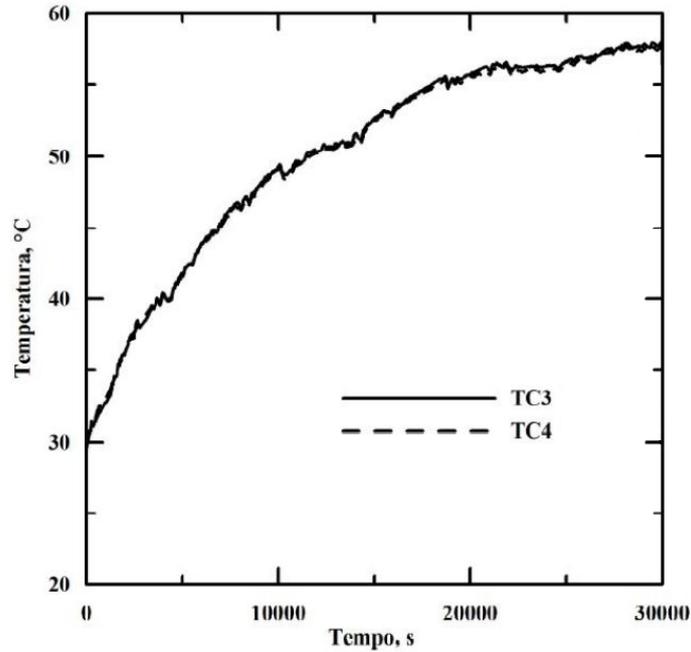


Figura 4.4: Temperatura de Fluido na Saída do Aquecedor e Perna Quente - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 6$ l/h

experimento a diferença chega a $2^{\circ}C$. Este comportamento difere do comportamento da perna quente, em razão da transferência de calor da tubulação da perna quente para o ambiente do laboratório, ser diferente do comportamento na perna fria no ponto de medição, devido a tubulação encontrar-se sob a influência da temperatura do fluido primário e do fluido secundário.

As curvas mostradas na Figura 4.6, apresentam as evoluções de temperaturas no fluido primário e na parede da tubulação, na saída do aquecedor.

Em relação à Figura 4.7, as curvas identificadas mostram a evolução das temperaturas no fluido primário e fluido secundário, no trocador de calor.

As evoluções de temperaturas no fluido primário na perna quente e na entrada da perna fria, podem ser observadas na Figura 4.8.

Em relação à Figura 4.9, são mostradas as curvas das evoluções das temperaturas no fluido primário na entrada do downcomer e na entrada da perna fria.

A Figura 4.10 apresenta curvas de diferenças de temperaturas entre entrada e saída do trocador de calor, entre perna quente e perna fria, entre saída do aquecedor

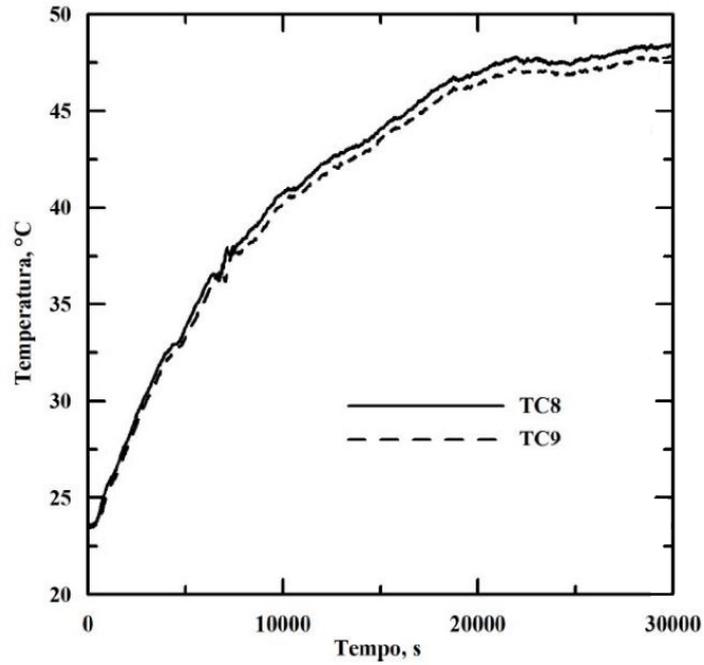


Figura 4.5: Temperatura de Fluido e Parede na Entrada da Perna Fria - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 6$ l/h

e entrada do downcomer e entre fluido e parede no trocador de calor. As curvas mostram a estabilização das temperaturas ao longo do tempo.

A curva que representa a vazão de circulação natural no medidor eletromagnético de vazão, encontra-se na Figura 4.11.

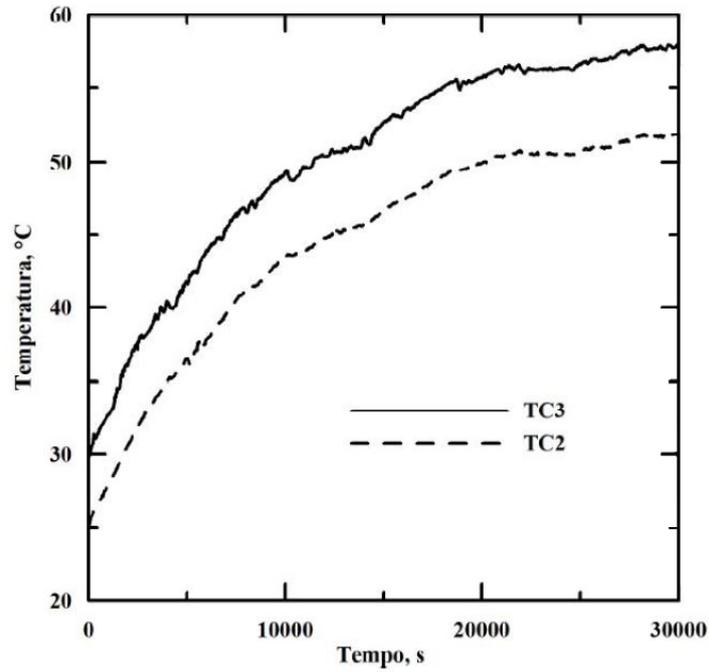


Figura 4.6: Temperatura de Fluido e Parede na Saída do Aquecedor - $P = 0,8 \text{ kW}$
 - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

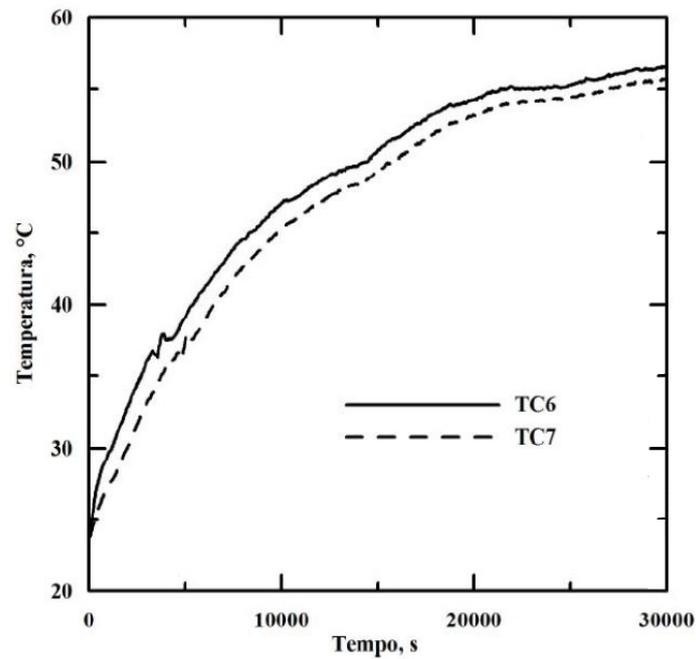


Figura 4.7: Temperatura de Fluido no Trocador de Calor - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

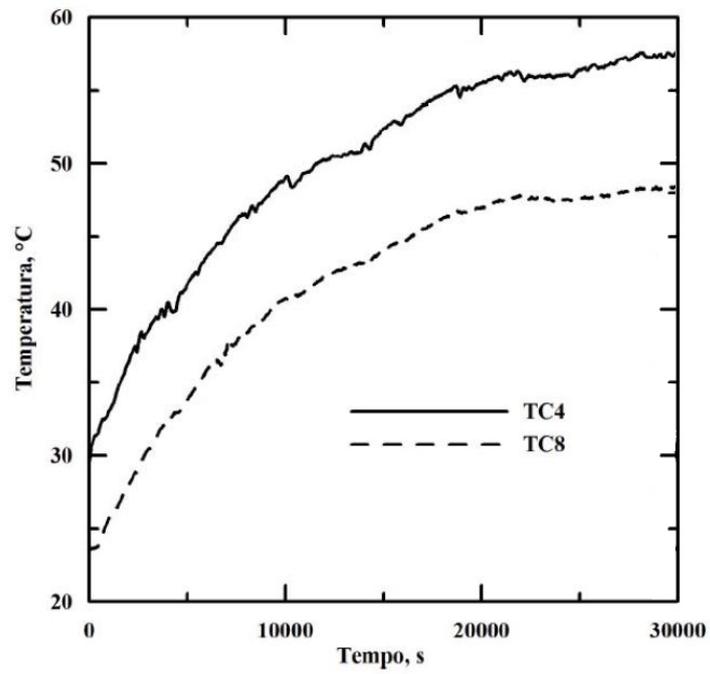


Figura 4.8: Temperatura na Perna Quente e na Entrada da Perna Fria - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 6$ l/h

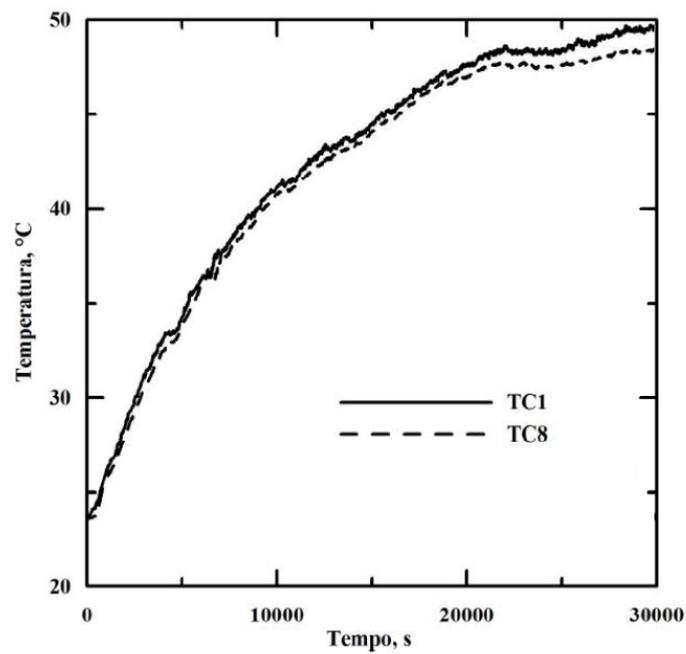


Figura 4.9: Temperatura do Fluido no Downcomer e Entrada da Perna Fria - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 6$ l/h

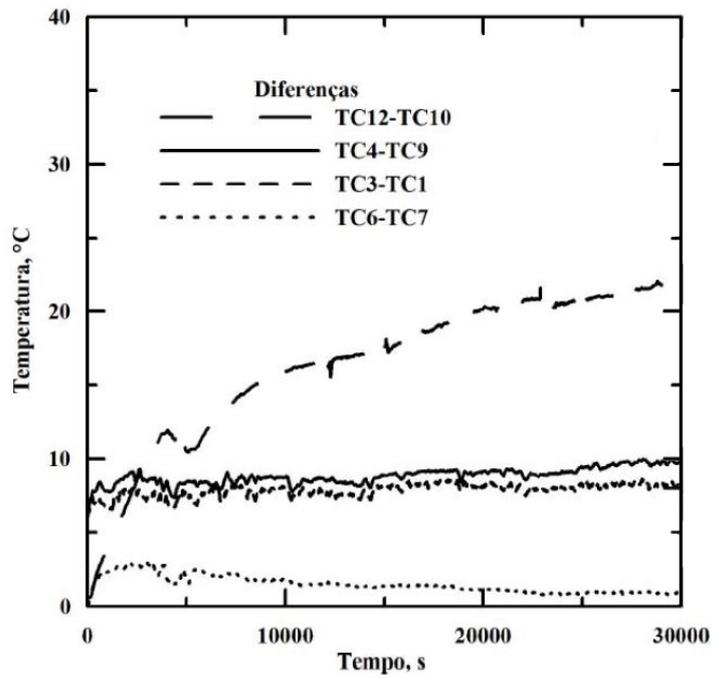


Figura 4.10: Estabilização de Diferenças de Temperaturas - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

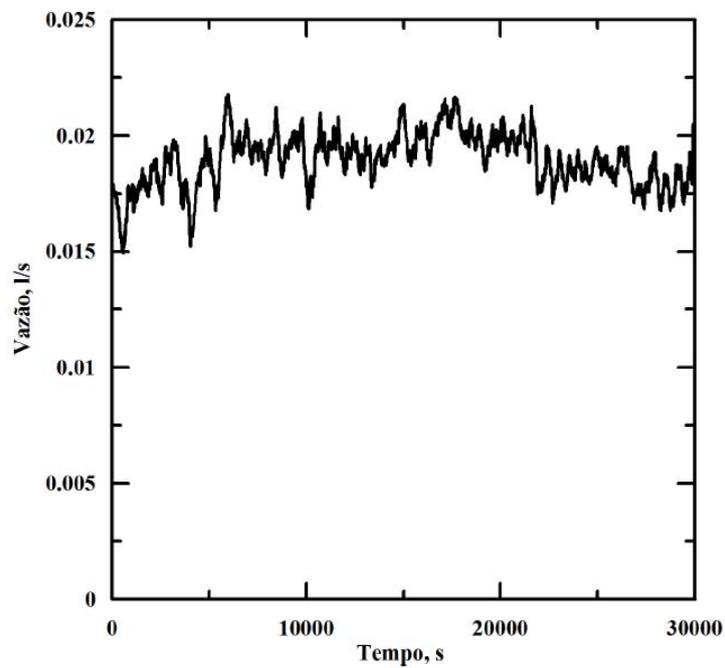


Figura 4.11: Vazão de Circulação Natural na Perna Fria - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

4.1.2 Resultados dos Experimentos com Potência de 0,4 kW

$$- Q_s = 6 \text{ l/h}$$

Observa-se na Figura 4.12, uma diminuição nas temperaturas na saída do aquecedor e na entrada do downcomer e um aumento na diferença de temperaturas entre estes pontos, comparando-se com o experimento com potência de 0,8 kW, com circulação de vazão de resfriamento secundário ajustada em 6 l/h. Os dois experimentos apresentam instabilidades em regime monofásico, sendo que para a menor potência observa-se que instabilidade é mais acentuada.

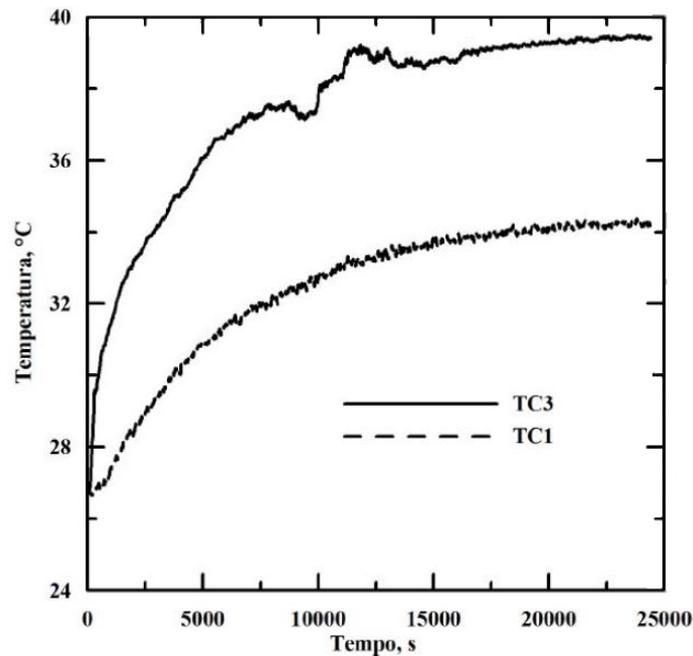


Figura 4.12: Temperatura no Downcomer e Saída do Aquecedor - $P = 0,4 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

Em relação à perna quente, observa-se na Figura 4.13 as curvas identificadas por fluido e parede, e que a menos da menor temperatura para a menor potência, os comportamentos são similares, inclusive na diferença de temperaturas entre fluido e parede. Os comportamentos de instabilidades são semelhantes, comparando-se ambos experimentos e levando-se em consideração os pontos na entrada do downcomer-saída do aquecedor e fluido-parede na perna quente.

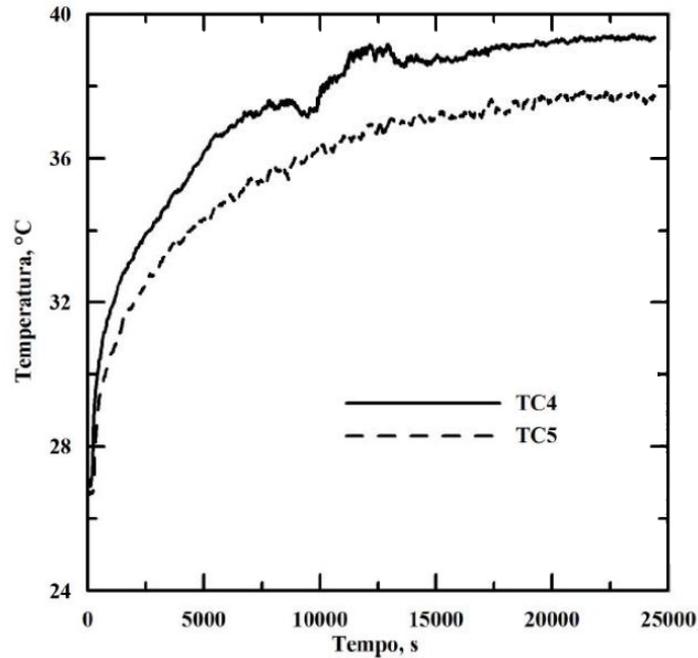


Figura 4.13: Temperatura de Fluido e Parede na Perna Quente - $P = 0,4 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

Os comportamentos na perna fria também apresentam semelhanças, conforme mostrado na Figura 4.14, se comparados os experimentos tanto pela diferença de temperatura entre fluido na entrada da perna fria e parede relativo à parede na entrada da perna fria, quanto na instabilidade do comportamento. Para esta potência observa-se maior instabilidade no comportamento de temperatura e menor temperatura nos pontos.

As diferenças de temperaturas entre saída do aquecedor e fluido na perna quente, em relação ao experimento conforme mostrado na Figura 4.15, são desprezíveis devido à proximidade de medição entre os pontos. Para a menor potência é observado um maior instabilidade. A instabilidade gerada na saída do aquecedor é acompanhada pelo ponto no fluido da perna quente.

Observa-se que a temperatura na entrada do secundário do trocador de calor manteve-se constante, conforme mostrado na Figura 4.16, em relação à medição executada no experimento com potência de $0,8 \text{ kW}$. A temperatura neste ponto apresentava um comportamento crescente e instável pela proximidade com a entrada

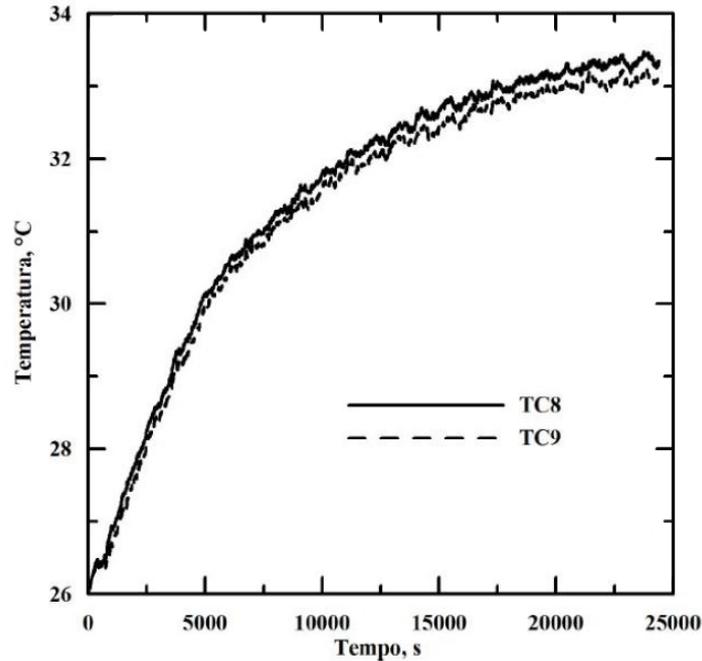


Figura 4.14: Temperatura de Fluido e Parede na Entrada da Perna Fria - $P = 0,4$ kW - $Q_s = 6$ l/h

do primário do trocador de calor. A diferença de temperaturas entre os pontos aumentou em cerca de 10°C . A exemplo do circuito primário, observa-se uma maior instabilidade na saída do secundário do trocador de calor, em comparação com o mesmo ponto para o experimento executado com potência de $0,8$ kW.

No experimento mostrado na Figura 4.17, a diferença de temperaturas entre os pontos é maior para a menor potência. Para a potência de $0,8$ kW, as curvas têm comportamentos semelhantes, quando as instabilidades ocorridas no fluido em um ponto são acompanhadas pela temperatura na parede. Para a potência de $0,4$ kW, a temperatura na parede da saída do aquecedor mantém um comportamento crescente e estável, enquanto a temperatura no fluido na saída do aquecedor apresenta um comportamento também crescente, mas instável.

Nesta Figura 4.18 observa-se um comportamento crescente no ponto na parede na entrada do trocador de calor com menor instabilidade, comparando-se com o comportamento de temperaturas no ponto do fluido na entrada do primário do trocador de calor. As diferenças de temperaturas entre fluido primário e parede na

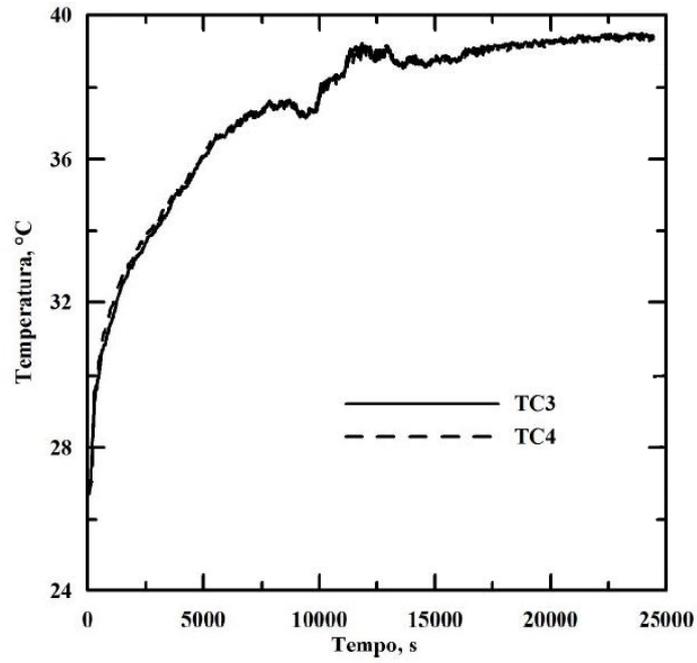


Figura 4.15: Temperatura de Fluido na Saída do Aquecedor e na Perna Quente - $P = 0,4 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

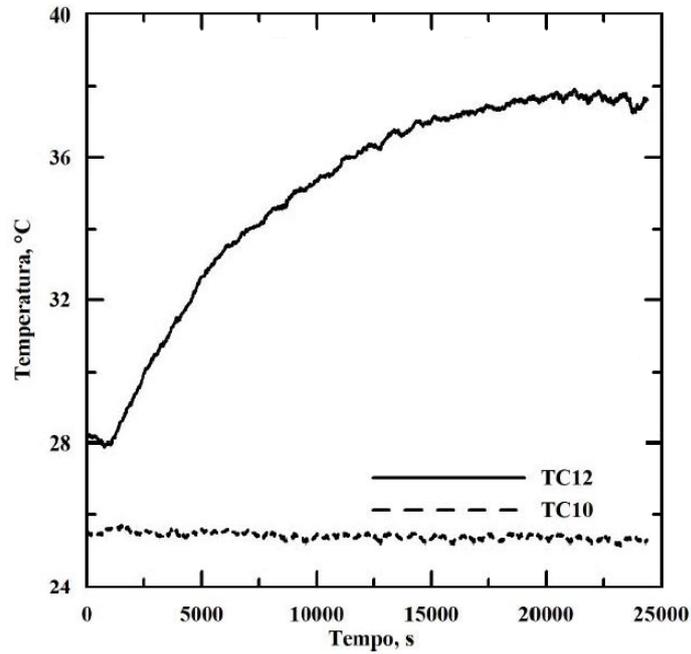


Figura 4.16: Temperatura na Entrada e Saída do Trocador de Calor - $P = 0,4 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

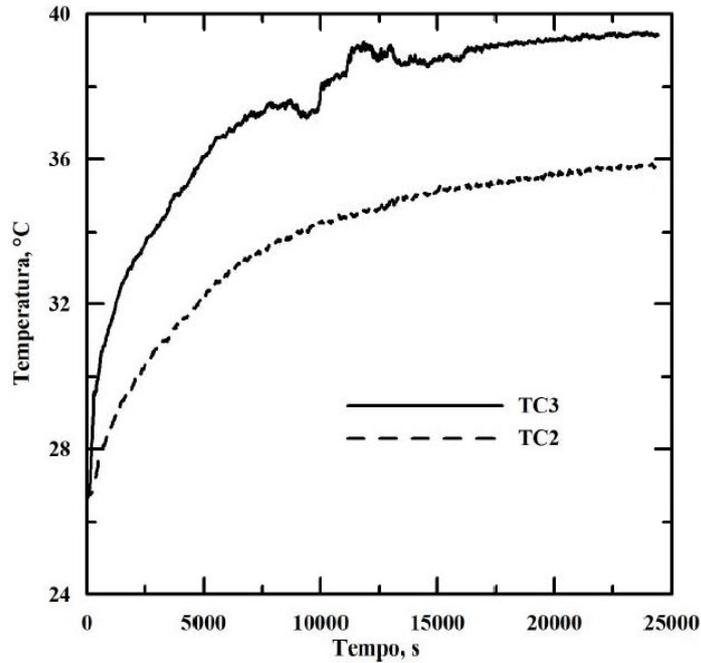


Figura 4.17: Temperatura de Fluido e Parede na Saída do Aquecedor - $P = 0,4 \text{ kW}$
- $Q_s = 6 \text{ l/h}$

entrada do trocador de calor apresentaram grandes variações ao longo do tempo, comparando-se com o experimento de potência $0,8 \text{ kW}$, em que esta diferença se manteve praticamente constante.

A diferença de temperaturas neste experimento aumentou, conforme mostrado na Figura 4.19, comparando-se com experimento com potência de $0,8 \text{ kW}$. O comportamento de fluido na entrada da perna fria é mais estável e suave na condição de menor potência. Nota-se também que o comportamento do fluido na entrada da perna fria independe do fluido na perna quente. Para o experimento de $0,8 \text{ kW}$ observa-se a influência de fluido na perna quente em relação à entrada de fluido na perna fria, no acompanhamento de seu comportamento.

Este experimento mostra na Figura 4.20, que o comportamento do fluido na entrada da perna fria é menos instável que o verificado no ponto da entrada do downcomer. Observa-se uma diferença maior de temperatura entre os pontos. No experimento com potência de $0,8 \text{ kW}$, identifica-se que a diferença só passa a aumentar a partir da fase de transição do regime monofásico para bifásico. Para o

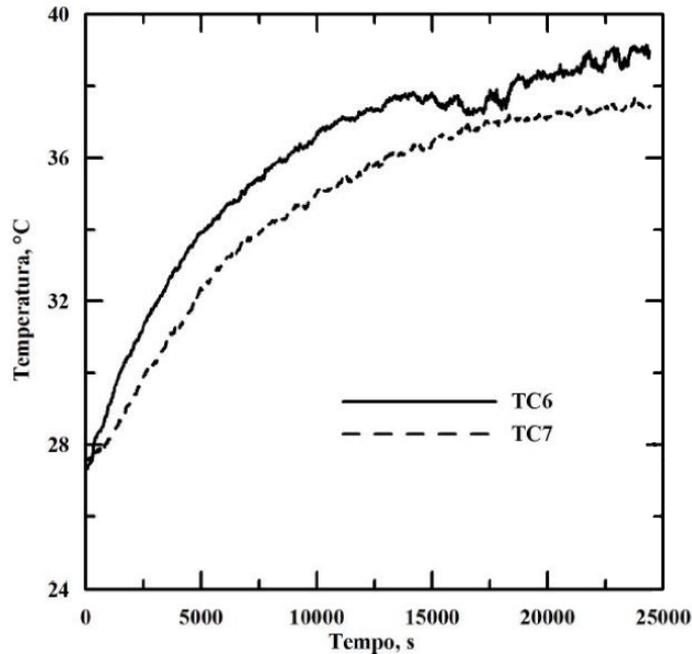


Figura 4.18: Temperatura de Fluido Primário e Secundário no Trocador de Calor - $P = 0,4 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

experimento de $0,4 \text{ kW}$, a diferença de temperaturas é crescente ao longo de todo o experimento. A influência do aquecedor é mais sensível no ponto na entrada do downcomer para este experimento.

As curvas de diferenças de temperaturas entre os pontos definidos na Figura 4.21, são semelhantes entre os experimentos de $0,4$ e $0,8 \text{ kW}$. Entre os pontos na entrada e saída do secundário do trocador de calor esta diferença é maior. Mesmo para a menor potência estas diferenças são próximas. Este comportamento é independente da potência aplicada ao aquecedor.

Observa-se que a vazão de circulação natural na perna fria apresenta maior instabilidade em regime monofásico. Deste ponto até o período de transição de regime monofásico para bifásico, a vazão mantém um comportamento com valor quase constante, conforme mostrado na Figura 4.22.

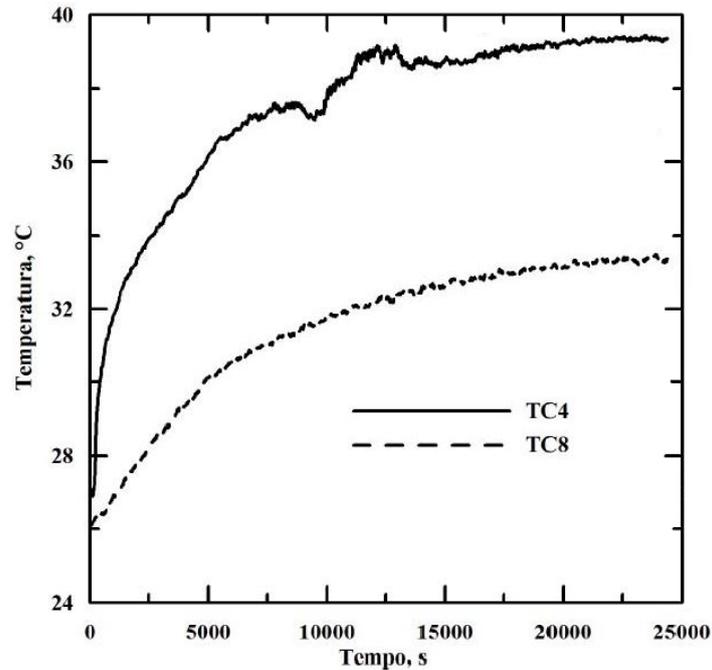


Figura 4.19: Temperatura na Perna Quente e Entrada da Perna Fria - $P = 0,4 \text{ kW}$
- $Q_s = 6 \text{ l/h}$

4.1.3 Modificação de Medição de Temperatura na Entrada do Circuito Secundário de Resfriamento

Com relação ao experimento com potência de $0,8 \text{ kW}$, um fato relevante foi a identificação da elevação de temperatura do fluido refrigerante do circuito secundário, sendo medida pelo termopar instalado na carcaça do trocador de calor. Esta medida de temperatura inferia erro no valor da diferença de temperatura entre a entrada e saída do secundário do trocador de calor, devido à cessão de calor por condução da estrutura da carcaça do trocador de calor para o ponto de entrada do secundário do trocador de calor. Em condições normais esta temperatura deveria estar próxima da temperatura ambiente do laboratório. Portanto, a diferença entre a entrada e saída do secundário do trocador de calor deveria ser maior do que a estabelecida no gráfico.

Em relação à Figura 4.23, a curva representa a alteração verificada com a mudança de posição do termopar na entrada do trocador de calor para o sistema

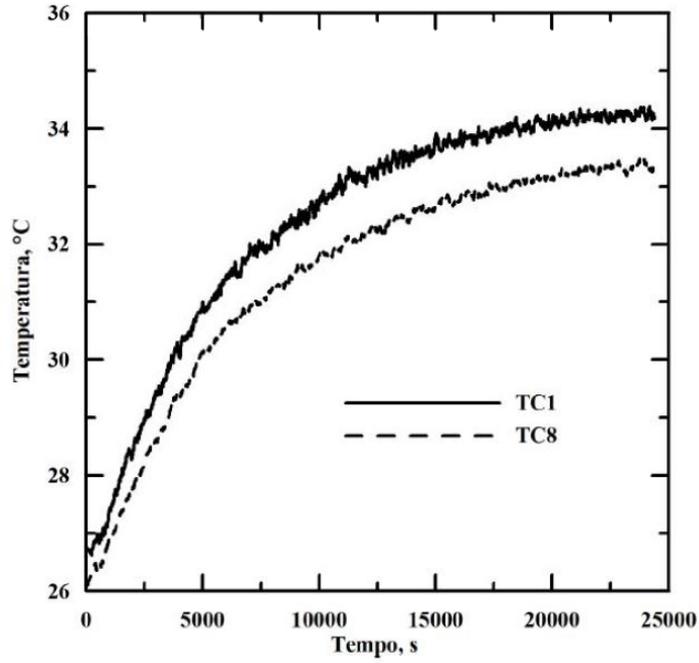


Figura 4.20: Temperatura do Fluido no Downcomer e Entrada da Perna Fria - $P = 0,4 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

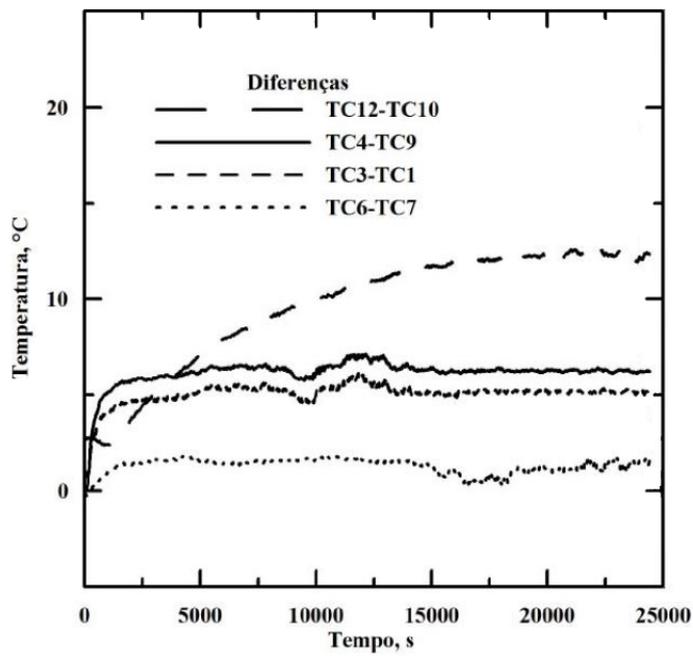


Figura 4.21: Estabilização de Diferenças de Temperaturas - $P = 0,4 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

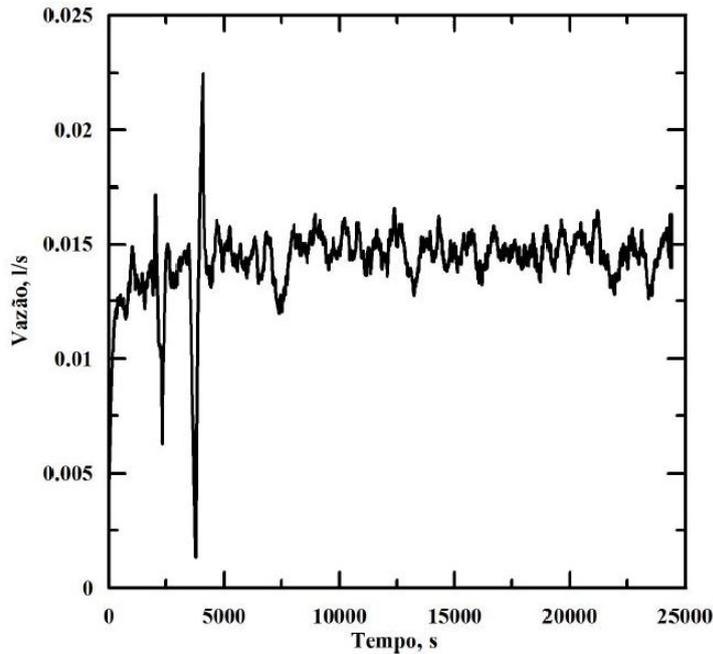


Figura 4.22: Vazão de Circulação Natural na Perna Fria - $P = 0,4 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$ de by-pass. Nota-se que havia um erro de medição, provocado pela influência da condução de calor da tubulação da perna quente.

4.1.4 Observações Importantes com relação aos Experimentos com Potências de $0,8 \text{ kW}$ e $0,4 \text{ kW}$

Observa-se que a vazão de circulação natural na perna fria apresenta maior instabilidade em regime monofásico compara-se com o experimento com potência de $0,8 \text{ kW}$. Deste ponto até o período de transição de regime monofásico para bifásico, a vazão mantém um comportamento com valor quase constante, conforme mostrado na Figura 4.24.

Para o experimento de $0,8 \text{ kW}$ ocorre menos instabilidade, mas a vazão aumenta no período de regime monofásico e na transição, com tendência a diminuir e estabilizar-se após o período de transição.

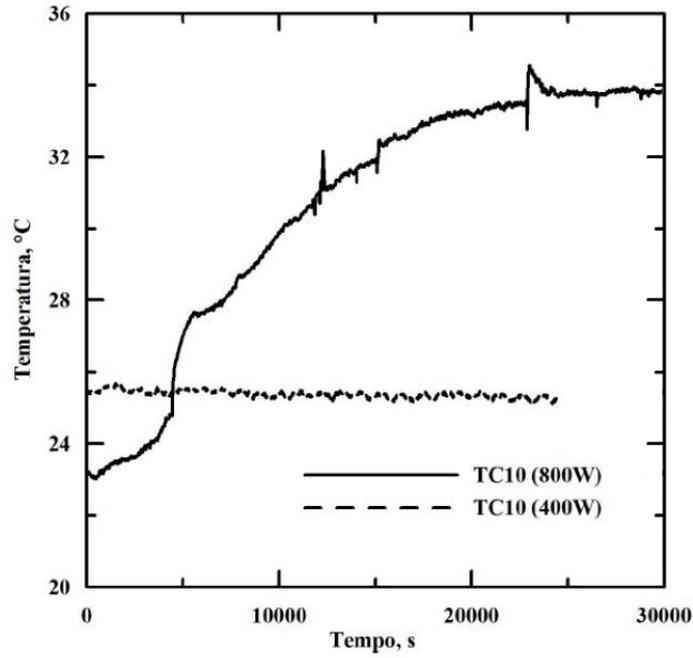


Figura 4.23: Mudança de Posição do Termopar T10 - $P = 800 \text{ W} / P = 400 \text{ W}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

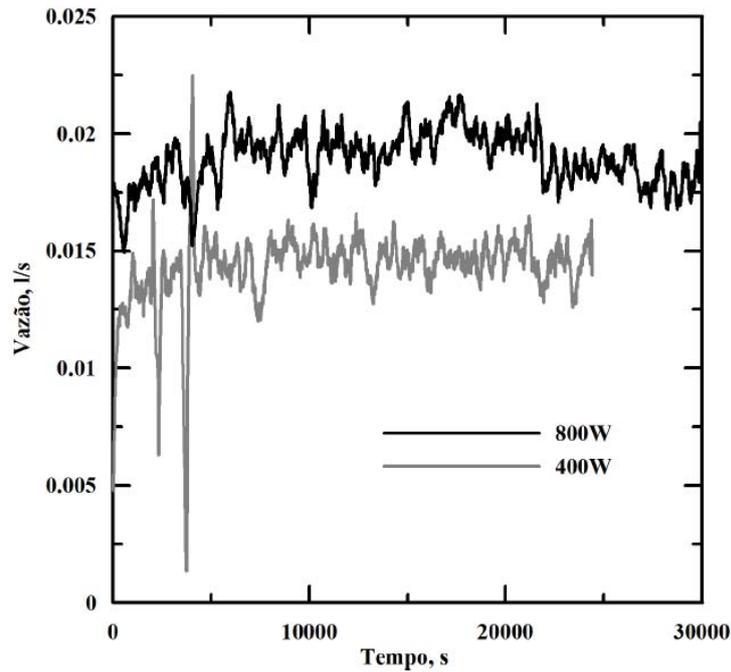


Figura 4.24: Comparação de Vazões de Circulação Natural na Perna Fria - $P = 800 \text{ kW} / P = 400 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

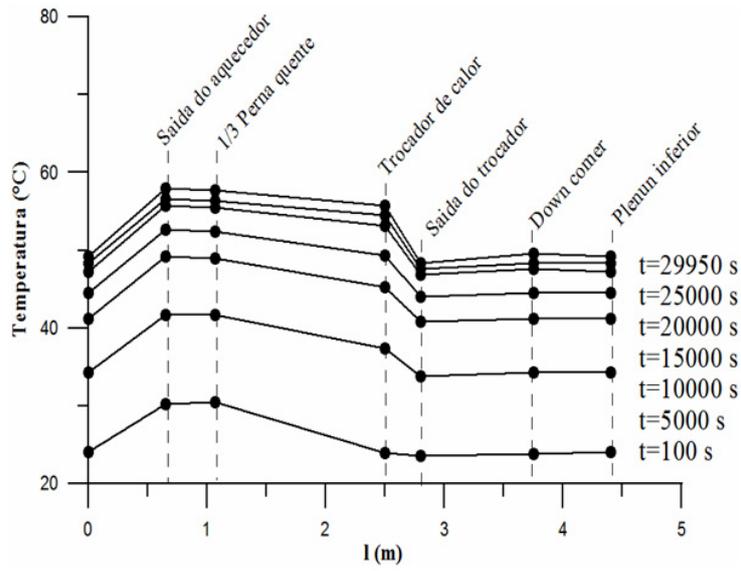


Figura 4.25: Evolução de Temperatura no Percurso Hidráulico - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

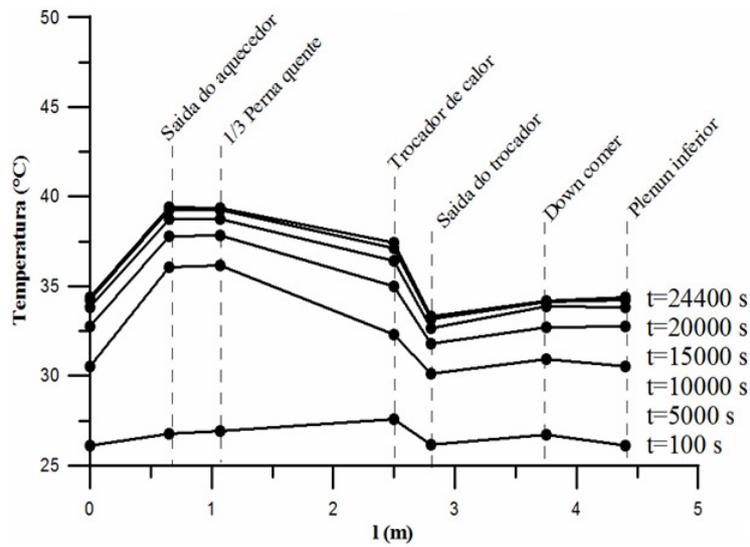


Figura 4.26: Evolução de Temperatura no Percurso Hidráulico - $P = 0,4 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

As curvas representam as evoluções das estabilizações dos aumentos de temperaturas nos pontos de medição, conforme pode ser visto nas Figuras 4.25 e 4.26, levando em conta o comprimento da tubulação. Desta forma, tem-se um visão mais abrangente das trocas de calor no sistema.

Para a maior potência a evolução é progressiva a intervalos regulares com comportamento mais homogêneo, conforme mostrado na Figura 4.25.

Em relação à Figura 4.26, para a menor potência, nota-se que existe um período de inércia térmica no início do experimento. Após esta etapa a estabilização de temperatura ocorre a intervalos mais reduzidos e com mais velocidade. O comportamento de estabilização é mais irregular.

4.1.5 Resultados dos Experimentos com Potência de 1,1 kW

$$- Q_s = 6 \text{ l/h}$$

Os experimentos em regime monofásico foram executados com a aplicação de potências elétrica de 1,1 kW e vazão de resfriamento secundário de 6 l/h. A apresentação dos resultados inclui as curvas de temperaturas e vazão de circulação natural na perna fria.

Neste experimento observa-se um comportamento estável de diferenças de temperaturas entre os pontos na entrada do downcomer e saída do aquecedor em regime monofásico, conforme mostrado na Figura 4.27. No período de transição ocorre alteração na curva com aumento brusco de temperatura. Esta temperatura reflete a geração de calor pelo aquecedor do sistema. As temperaturas apresentaram uma diferença, que se manteve praticamente constante até o intervalo de tempo de 22.500 a 25.000 segundos, Após a mudança de regime, as curvas apresentaram uma tendência de crescimento e logo após um declínio.

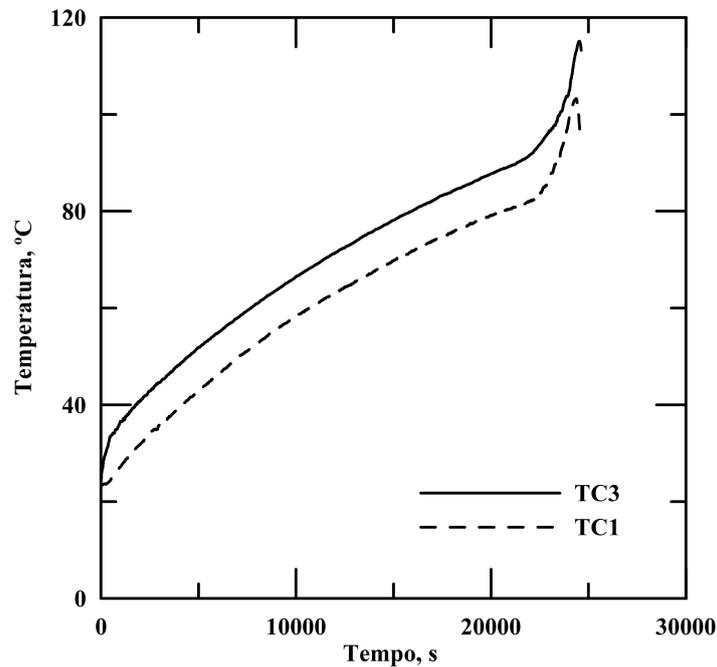


Figura 4.27: Temperatura no Downcomer e na Saída do Aquecedor - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

As temperaturas no fluido na perna quente tem comportamento semelhante ao verificado na parede na perna quente, conforme mostrado na Figura 4.28, embora esta temperatura apresente maior distorção. A variação da temperatura na parede na perna quente, quando em regime monofásico, mostra que a temperatura ambiente tem influência no seu comportamento neste período. Na transição de regime monofásico para bifásico, o comportamento é semelhante em comparação com a temperatura no fluido na perna quente, que apresenta mais linearidade em regime monofásico. Verificou-se que as temperaturas no fluido e parede na perna quente apresentaram diferenças com tendência de aumento até o intervalo de tempo de 22.500 a 25.000 segundos, quando, pela mudança de regime, as curvas apresentaram uma tendência de equiparação de diferenças de temperaturas.

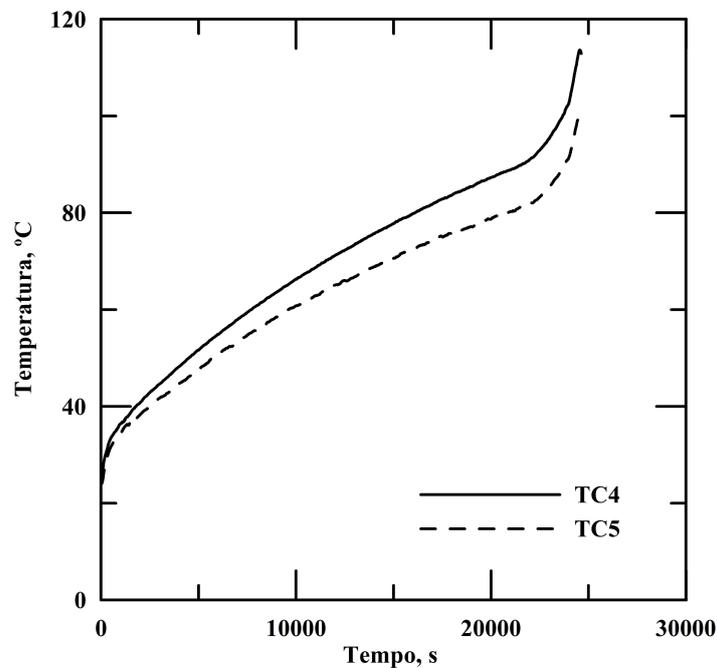


Figura 4.28: Temperatura de Fluido e Parede na Perna Quente - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

As temperaturas na perna fria têm comportamentos quase idênticos neste experimento, com semelhança aos outros dois experimentos com potências de 0,4 e 0,8 kW. O experimento apresenta curvas estáveis, conforme mostrado na Figura 4.29. As temperaturas no fluido e parede na entrada da perna fria apresentaram aumento de temperatura até 22.500 segundos e declínio até 25.000 segundos.

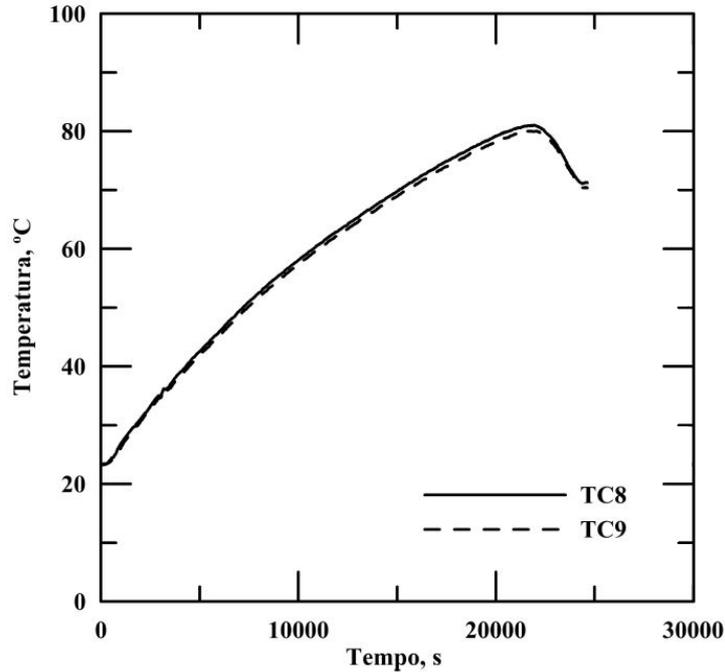


Figura 4.29: Temperatura de Fluido e Parede na Entrada da Perna Fria - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 6$ l/h

Neste experimento identificou-se, conforme mostrado na Figura 4.30, que as temperaturas têm comportamentos quase idênticos com diferenças de temperaturas desprezíveis. Este comportamento condiz com os outros dois experimentos com potências de 0,4 e 0,8 kW. As temperaturas na saída do aquecedor e no fluido na perna quente apresentaram comportamento idêntico, com aumento de temperatura mais suave até 22.500 segundos e mais acentuado até 25.000 segundos.

O comportamento das temperaturas na saída do secundário do trocador de calor neste experimento, conforme mostrado na Figura 4.31, apresenta maior estabilidade em regime monofásico, em comparação com os outros dois experimentos. Apresenta pouca instabilidade progressiva na transição de regime monofásico para bifásico. A temperatura na entrada do secundário do trocador de calor manteve-se constante com a mudança de posição do termopar. As temperaturas na entrada e saída do secundário do trocador de calor apresentaram comportamento sem alteração de tendências. No intervalo de 22.500 a 25.000 segundos, a temperatura de saída do trocador de calor apresentou maior variação.

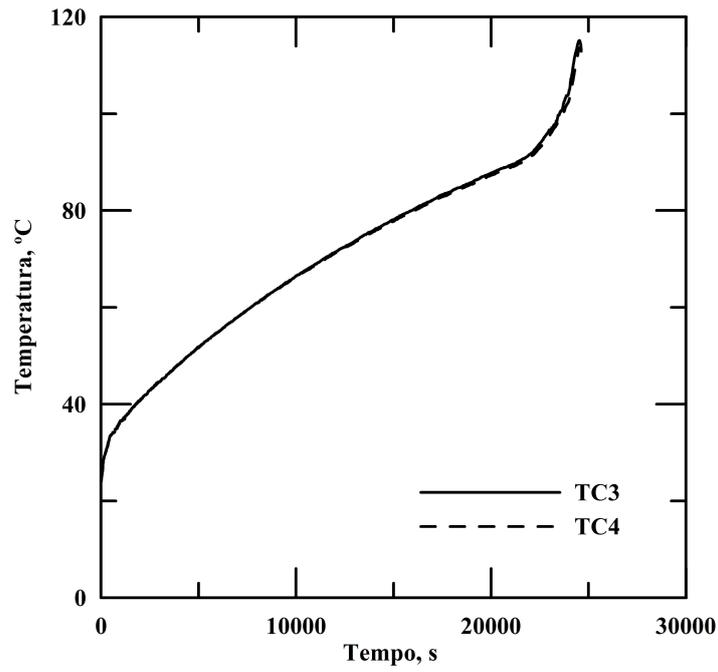


Figura 4.30: Temperatura de Fluido na Saída do Aquecedor e na Perna Quente - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

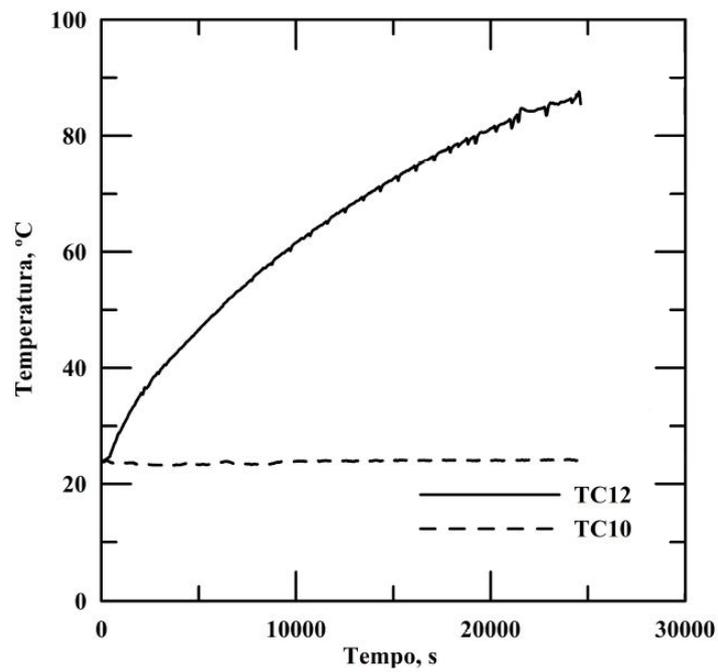


Figura 4.31: Temperatura no Trocador de Calor - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

Este experimento apresentou comportamento não esperado, conforme mostrado na Figura 4.32, para as temperaturas na parede da saída do aquecedor. Uma explicação leva em conta a presença de ar no aquecedor, com a diminuição da temperatura de parede devido ao não contato do fluido com a mesma, resultando em diminuição da troca de calor com a presença de ar entre fluido e parede. As temperaturas na parede e fluido na saída do aquecedor apresentaram diferença praticamente constante. A partir de 12.500 segundos, a temperatura de parede na saída do aquecedor entrou em declínio até o tempo de 22.500 segundos, quando apresentou recuperação e aumento de temperatura até 25.000 segundos. A temperatura de saída do aquecedor apresentou tendência mais suave até 22.500 segundos e aumento mais acentuado até 25.000 segundos e, posteriormente um declínio.

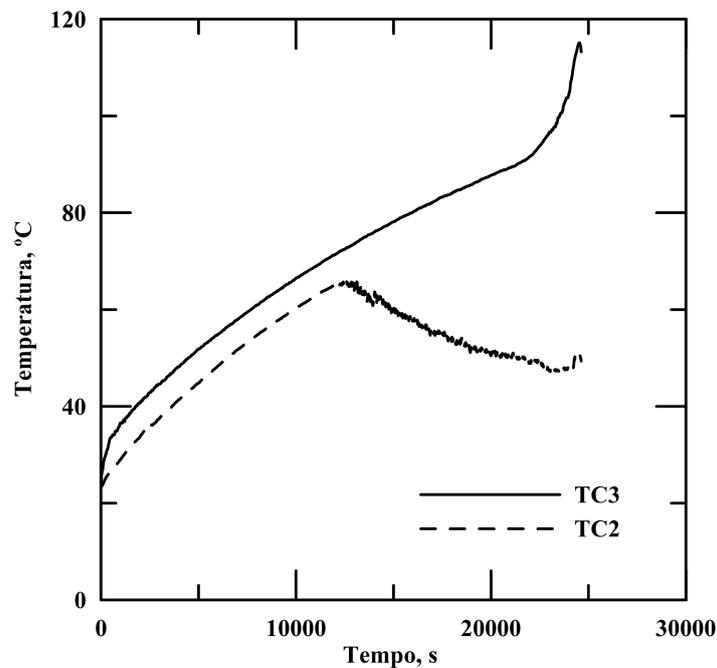


Figura 4.32: Temperatura de Fluido e Parede na Saída do Aquecedor - $P = 1,1 \text{ kW}$
- $Q_s = 6 \text{ l/h}$

A Figura 4.33 mostra um comportamento no fluido primário na entrada do trocador de calor que corresponde ao comportamento no parede na saída do aquecedor. Esta situação pode indicar a presença de ar no trocador de calor no ponto de medição, com influência na transferência de calor. A temperatura na parede na entrada do trocador de calor reflete a retirada de calor do fluido no circuito

secundário. As temperaturas no fluido e parede na entrada do trocador de calor apresentaram diferença praticamente constante. A partir de 1.500 segundos, a temperatura do fluido primário na entrada do trocador de calor entrou em declínio até o tempo de 22.500 segundos, quando apresentou recuperação e aumento de temperatura até 25.000 segundos. A temperatura da parede na entrada do trocador de calor apresentou tendência de aumento suave e constante.

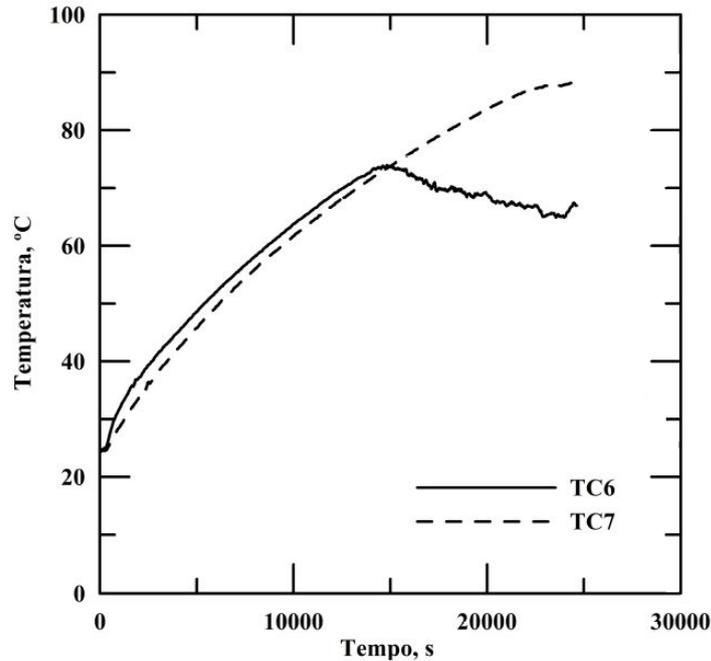


Figura 4.33: Temperatura de Fluido no Trocador de Calor - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

Estas curvas, conforme mostrado na Figura 4.34, apresentam m comportamento estável entre os pontos, com mudança de comportamento no período de transição de regime monofásico para bifásico. No período de regime monofásico os valores de diferenças de temperaturas são aproximadamente constantes. Esta condição permite o cálculo de fator de fricção para comparação com o fator de fricção do protótipo do APWR, de modo a verificar a condição de similaridade entre o protótipo e o CCN. As temperaturas no fluido na perna quente e fluido na entrada da perna fria apresentaram diferença praticamente constante. A partir de 22.500 segundos, a temperatura de fluido na entrada da perna fria entrou em declínio até o tempo de 25.000 segundos. A temperatura de fluido na perna quente apresentou tendência

mais suave até 22.500 segundos e aumento mais acentuado até 25.000 segundos.

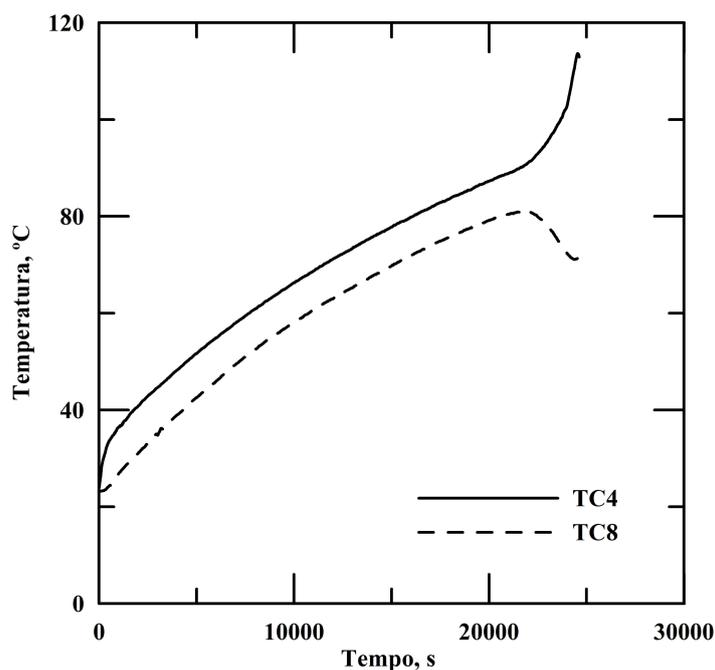


Figura 4.34: Temperatura na Perna Quente e na Entrada da Perna Fria - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 6$ l/h

As temperaturas nos pontos são quase idênticas, conforme mostrado na Figura 4.35. No período de transição entre o regime monofásico e o bifásico, ocorre a mudança de comportamento. As diferenças de temperaturas tendem a diminuir com o aumento da potência aplicada. As temperaturas na entrada do downcomer e no fluido na entrada da perna fria não apresentaram diferença. A partir de 22.500 segundos, a temperatura do fluido na entrada da perna fria entrou em declínio até o tempo de 25.000 segundos. A temperatura na entrada do downcomer apresentou tendência mais suave até 22.500 segundos, aumento mais acentuado até 24.000 segundos e declínio até 25.000 segundos.

Nota-se na Figura 4.36 um valor negativo na diferença entre fluido primário e parede na entrada do trocador de calor, pois é esperado que nos experimentos que o fluido primário na entrada do trocador de calor seja superior à parede, que corresponde a temperaturas maiores no circuito primário. Em regime monofásico as diferenças são praticamente constantes, exceto entre entrada e saída do secundário do trocador de calor, porque o valor da entrada permanece constante e da saída

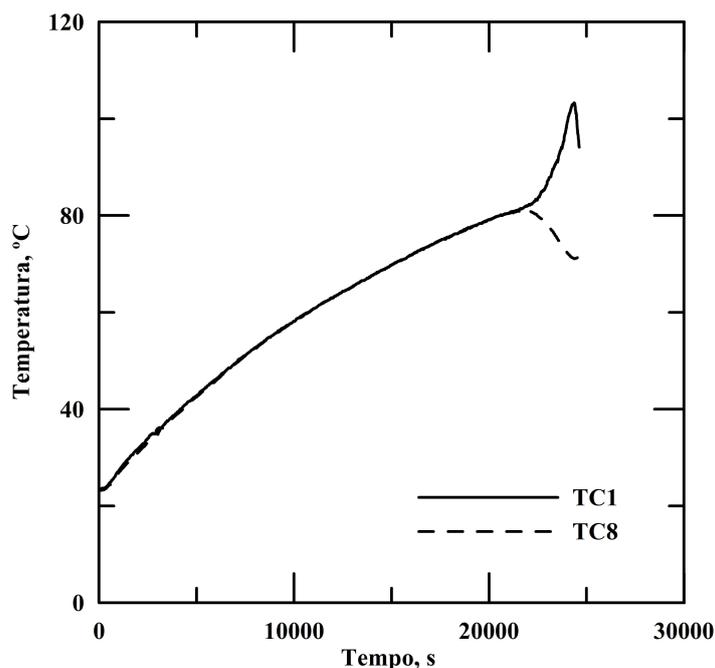


Figura 4.35: Temperatura do Fluido no Downcomer e Entrada da Perna Fria - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

corresponde à retirada de calor no circuito secundário. As trocas de calor no primário e secundário do trocador de calor não apresentaram diferença até 22.500 segundos. A partir de 22.500 segundos a temperatura de fluido na perna quente e parede na entrada da perna fria aumentou até 25.000 segundos. A diferença de temperatura do fluido na saída do aquecedor e entrada do downcomer apresentou declínio entre 22.500 e 24.000 segundos e aumento de 24.000 a 25.000 segundos. Na entrada-saída do trocador de calor houve aumento suave e constante até 25.000 segundos. No fluido primário na entrada do trocador de calor-parede do trocador de calor a diferença permaneceu constante até 15.000 segundos, declínio até 24.000 segundos e aumento até 25.000 segundos.

Em relação à Figura 4.37, a curva representa a vazão de circulação natural que permanece quase constante em regime de escoamento monofásico. No período de transição de regime monofásico para bifásico, ocorre grande instabilidade na vazão de circulação natural na perna fria. A vazão de circulação natural apresentou valor praticamente constante de $0,02 \text{ l/s}$ até 22.500 segundos, quando a vazão variou entre $0,02$ e $0,2 \text{ l/s}$.

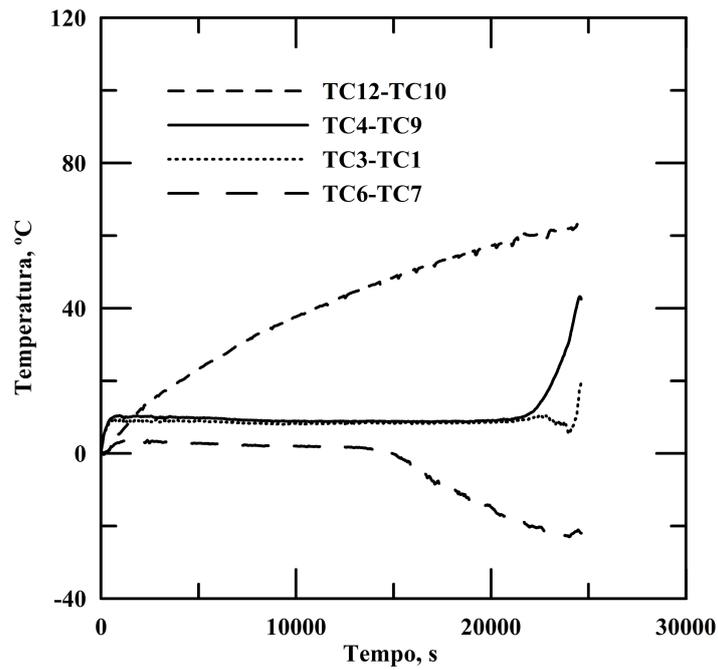


Figura 4.36: Estabilização de Diferenças de Temperaturas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

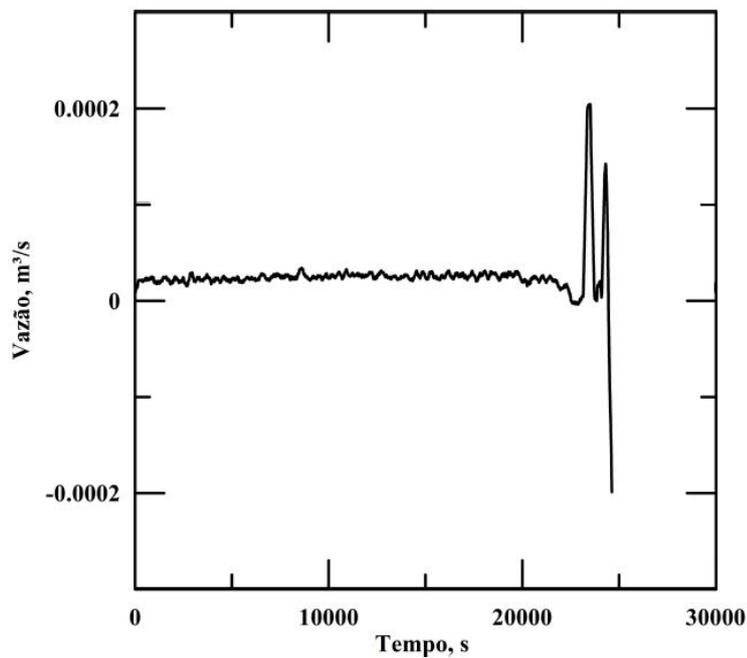


Figura 4.37: Vazão de Circulação Natural na Perna Fria - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

4.2 Experimentos em Regime Bifásico

Os experimentos em regime bifásico foram executados com a aplicação de potências elétricas no aquecedor, de $P = 1,1$ kW, $P = 1,0$ kW, $P = 0,9$ kW e $P = 0,8$ kW, e vazões secundárias de resfriamento de $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h. Os resultados incluem médias de comprimentos e velocidades de bolhas, histogramas de comprimentos de bolhas, histogramas de velocidades de bolhas e correlações de velocidades em função de comprimentos de bolhas.

Para a obtenção dos dados experimentais foram utilizadas técnicas ultrassônicas e de visualização para identificação de quantidades, comprimentos e velocidades de bolhas, com o intuito de observar o comportamento do CCN. Na execução dos experimentos foram obtidas 10 (dez) aquisições de sinais e imagens em alta velocidade, sob diversas condições de potências e vazões secundárias de resfriamento.

4.2.1 Quadro Comparativo de Quantidades de Bolhas, para todos os casos

Um quadro comparativo com as quantidades de bolhas geradas, referenciado na Tabela 4.1, descreve uma distribuição decrescente de quantidades de bolhas, em função da combinação de potências elétricas e vazões secundárias de resfriamento. Excetuando a combinação de $P = 1,1$ kW e $Q_s = 3$ l/h, em que as quantidades de bolhas geradas nesta condição não seguiram o padrão verificado nos outros experimentos. Este experimento apresentou a ocorrência de sucessivos escoamentos do tipo agitado, não sendo possível pelas técnicas utilizadas, se detectar uma maior quantidade de bolhas. O experimento com a combinação de $P = 0,8$ kW e $Q_s = 12$ l/h gerou uma menor quantidade de bolhas dentro do padrão esperado, devido à combinação de menor potência elétrica com menor vazão secundária de resfriamento.

Tabela 4.1: Quantidades de Bolhas, para todos os casos

Q_s l/h	$P = 1,1$ kW	$P = 1,0$ kW	$P = 0,9$ kW	$P = 0,8$ kW
3	138	263	260	254
6	289	259	250	244
9	282	239	171	121
12	198	168	155	82

4.2.2 Gráfico Comparativo de Quantidades de Bolhas versus Vazões Secundárias, para todos os casos

Neste panorama, conforme apresentado no gráfico da Figura 4.38, as vazões com $Q_s = 3$ l/h e $Q_s = 6$ l/h mostram que as potências não tiveram influência relevante na geração de quantidade de bolhas, visto que as quantidades são bastante similares para todas as vazões. O resultado para a potência $P = 1,1$ kW não acompanhou esta tendência. Entretanto, pode ser notado que para a vazão $Q_s = 6$ l/h tem-se o início da tendência da influência dos valores de potências nas quantidades de bolhas. Para as vazões de $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h, as potências passam a ter uma influência mais decisiva nas quantidades de bolhas.

4.2.3 Histogramas de Comprimentos de Bolhas, para todos os casos

Os histogramas de comprimentos de bolhas são destinados à análise de comportamentos de casos, combinando potências elétricas e vazões secundárias de resfriamento. Estas análises permitem identificar a geração de volume de vapor e o aparecimento de padrões de escoamentos bifásicos. Os resultados podem ser influenciados por condições de enchimento, visto que existe a possibilidade de iniciar o experimento com presença de ar no circuito hidráulico, principalmente no aquecedor.

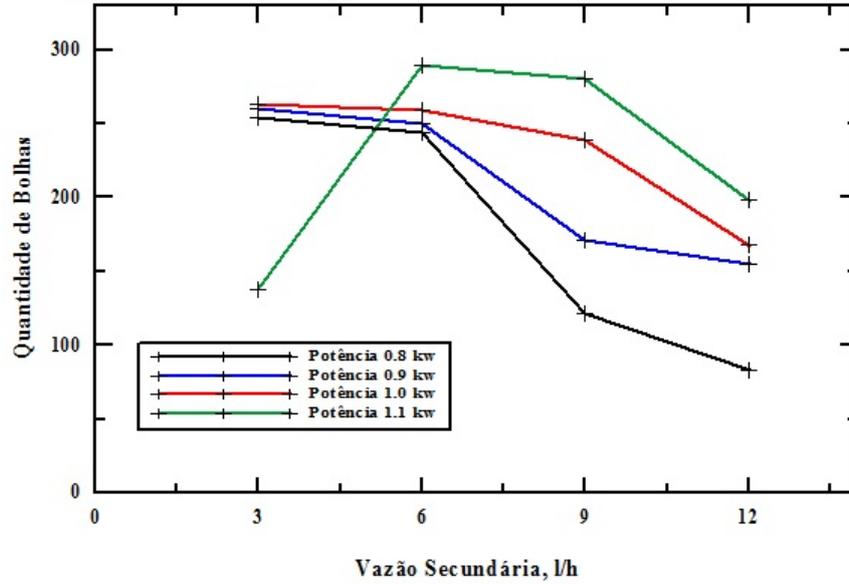


Figura 4.38: Quantidades de Bolhas versus Vazões Secundárias, para todos os casos

Comprimentos de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$

Para os experimentos utilizando potência $P = 1,1 \text{ kW}$ serão executadas análises dos histogramas de comprimentos de bolhas, mostrados nas Figuras 4.39, 4.40, 4.41 e 4.42. Nestes histogramas observa-se que para $Q_s = 12 \text{ l/h}$ foi verificada uma maior frequência na quantidade de bolhas. Os experimentos com $Q_s = 3 \text{ l/h}$ e $Q_s = 12 \text{ l/h}$ denotam padrões dos histogramas semelhantes entre estas condições, e contemplam maior diversidade de comprimentos de bolhas. Além disso, pode-se deduzir que pelos comprimentos de bolhas ocorreram os padrões de escoamentos do tipo transição de pistonado-agitado e do tipo agitado. Estes comprimentos de bolhas alcançaram na faixa até $8 D$ em sua maioria, mas em raríssimos casos ocorreram valores na ordem de $18 D$. O histograma de comprimentos de bolhas, referente ao experimento com $Q_s = 9 \text{ l/h}$ apresentou uma curva de distribuição normal com melhor simetria. Nesta condição, os padrões de escoamentos dos tipo bolhas dispersas, tipo bolhas de Taylor e tipo pistonado, corresponderam aos comprimentos de bolhas. O experimento com $Q_s = 12 \text{ l/h}$ não retratou totalmente o que se esperava, devido à ocorrência de bolhas com comprimentos acima de $18 D$. Este fato sugere a probabilidade de presença de bolhas de ar acumuladas no circuito hidráulico, apesar de

todo cuidado com o procedimento de enchimento. Os resultados mostraram que a partir de $Q_s = 3$ l/h, ocorre a tendência de diminuição dos comprimentos das bolhas e aumento nas quantidades de bolhas com menores comprimentos.

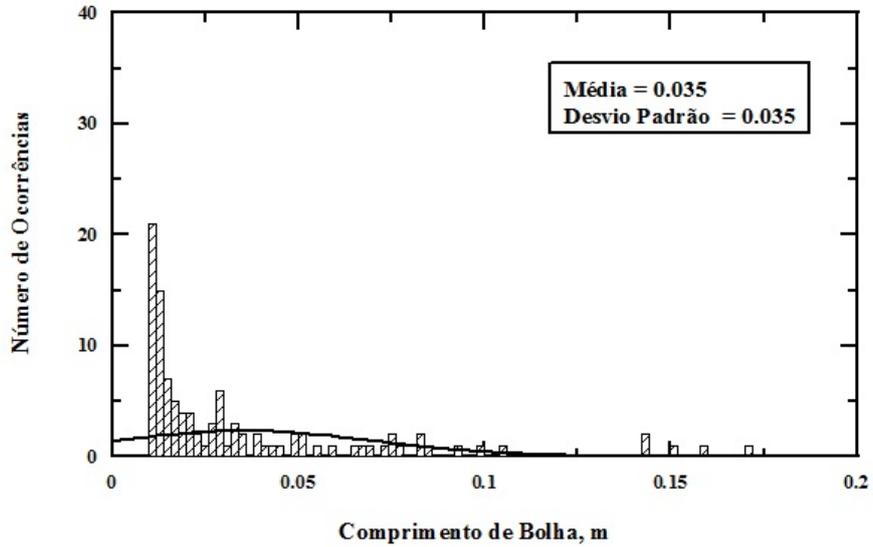


Figura 4.39: Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 3$ l/h

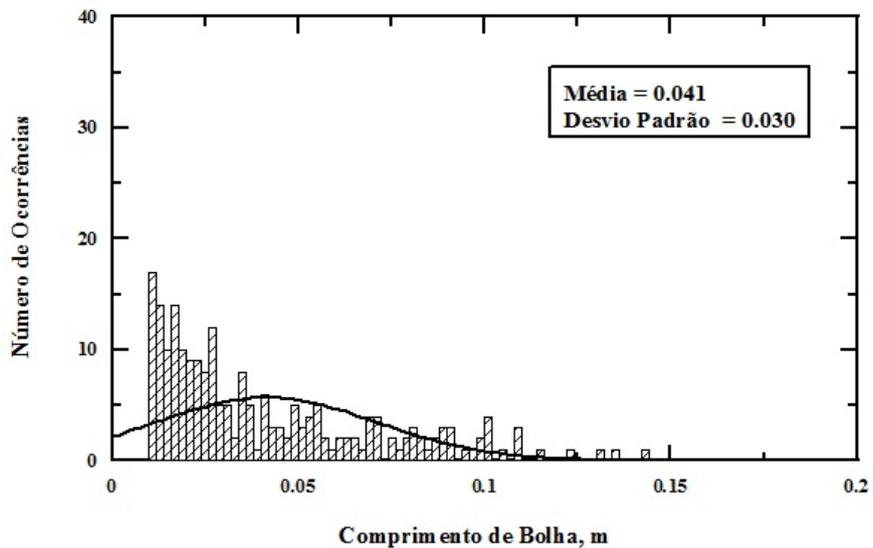


Figura 4.40: Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 6$ l/h

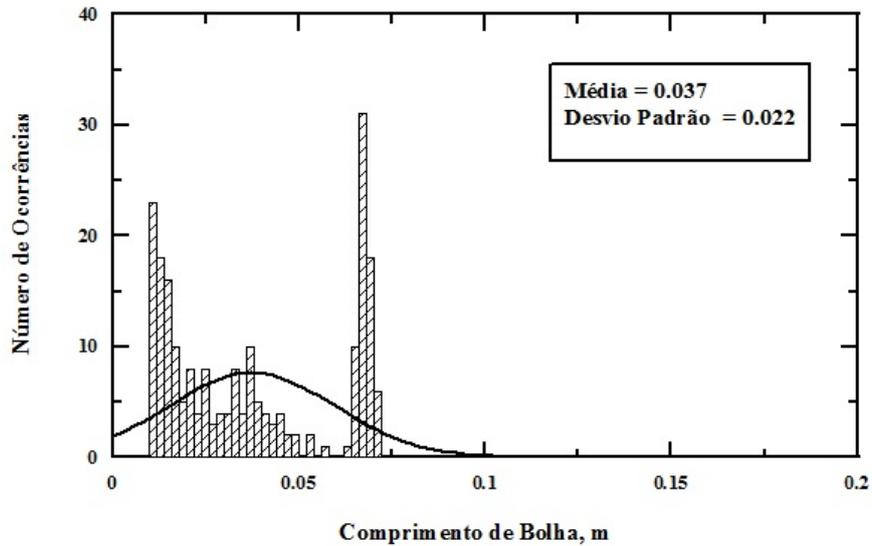


Figura 4.41: Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

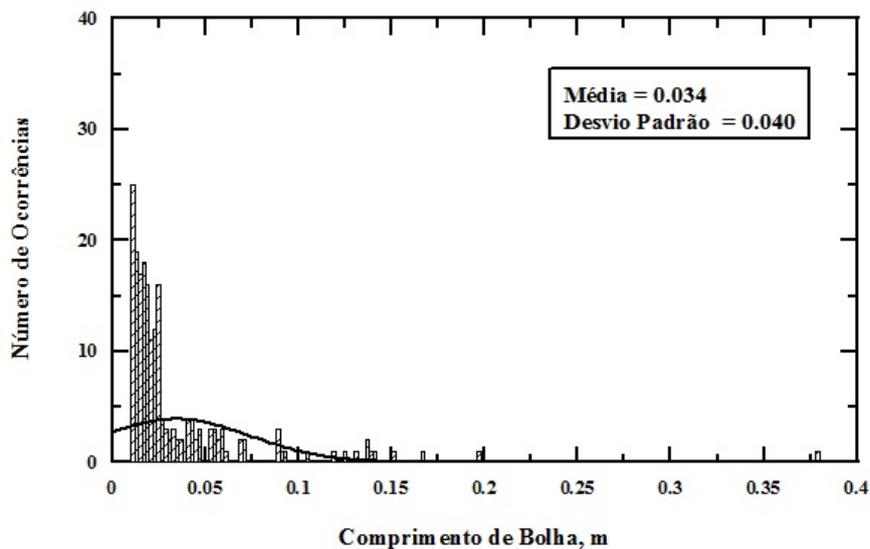


Figura 4.42: Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$

Comprimentos de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$

Os experimentos operando com $P = 1,0 \text{ kW}$ são comparados, a partir dos histogramas de comprimentos de bolhas das Figuras 4.43, 4.44, 4.45 e 4.46. Os histogramas permitem observar o comportamento de geração de bolhas com menores comprimentos, se comparados com aqueles de potência $P = 1,1 \text{ kW}$. A utilização de vazões secundárias de resfriamento com valores maiores provocou um deslocamento

dos valores do histograma, para a faixa de comprimentos de bolhas até 0,04 m. O experimento com $Q_s = 9$ l/h tem maior frequência de quantidade de bolhas e também semelhança com o experimento utilizando $Q_s = 12$ l/h. Por sua vez, o experimento com $Q_s = 6$ l/h apresentou a curva de distribuição normal com melhor simetria, além de maior diversidade de comprimentos de bolhas. Os comprimentos de bolhas identificados não ultrapassaram o valor de 3 D. A ocorrência de padrões de escoamento do tipo bolhas dispersas, tipo bolhas de Taylor e tipo pistonado, foi uma das características destes experimentos.

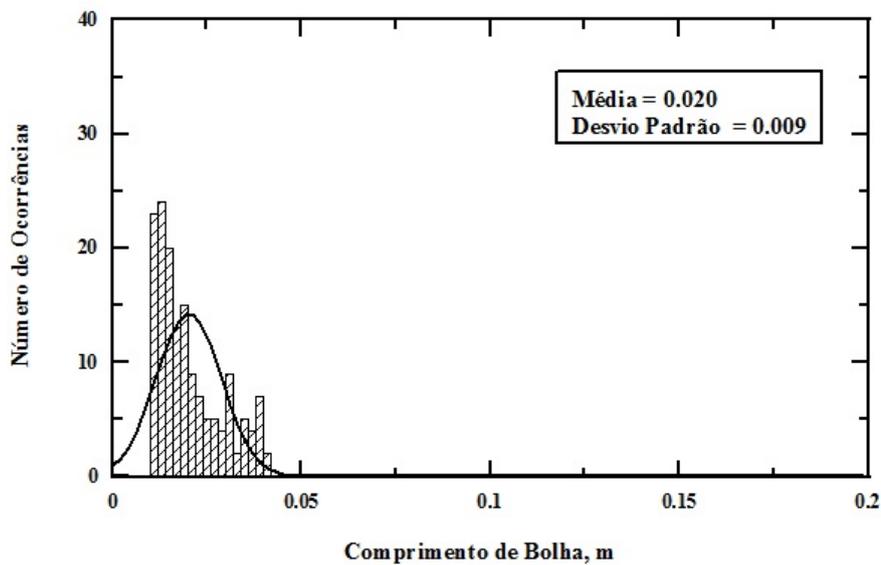


Figura 4.43: Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 1,0$ kW - $Q_s = 3$ l/h

Comprimentos de Bolhas - $P = 0,9$ kW

Os experimentos foram operados com potência $P = 0,9$ kW, conforme mostrado nas Figuras 4.47, 4.48, 4.49 e 4.50, onde estão representados os histogramas de comprimentos de bolhas. Analisando-se estes histogramas, observa-se que os experimentos com $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h têm comportamentos similares. O experimento com $Q_s = 12$ l/h mostra a geração de bolhas com comprimentos mais diversificados. O maior valor de frequência na quantidade de bolhas está relacionado com a curva de distribuição normal, que apresenta a curva de distribuição normal mais simétrica, para o experimento com $Q_s = 6$ l/h. Os comprimentos de bolhas

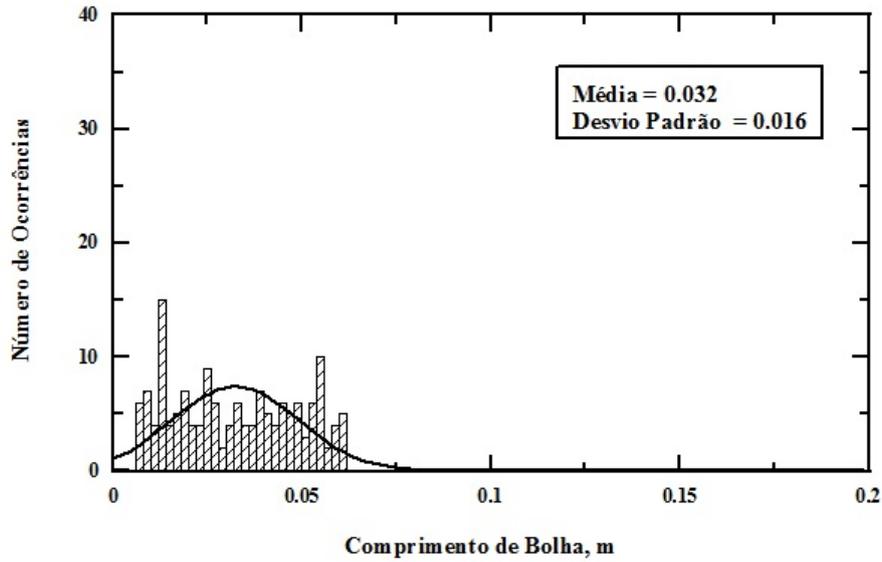


Figura 4.44: Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

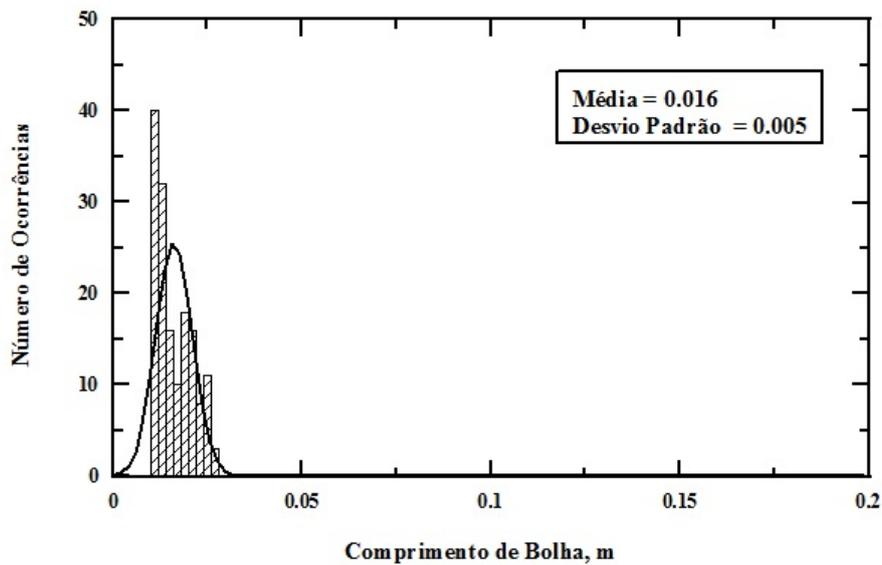


Figura 4.45: Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

se mantiveram dentro da faixa de até $10 D$. Os experimentos apresentaram uma sequência de valores de comprimentos de bolhas, que sugere a ocorrência de padrões de escoamento do tipo bolhas dispersas, tipo bolhas de Taylor e tipo pistonado.

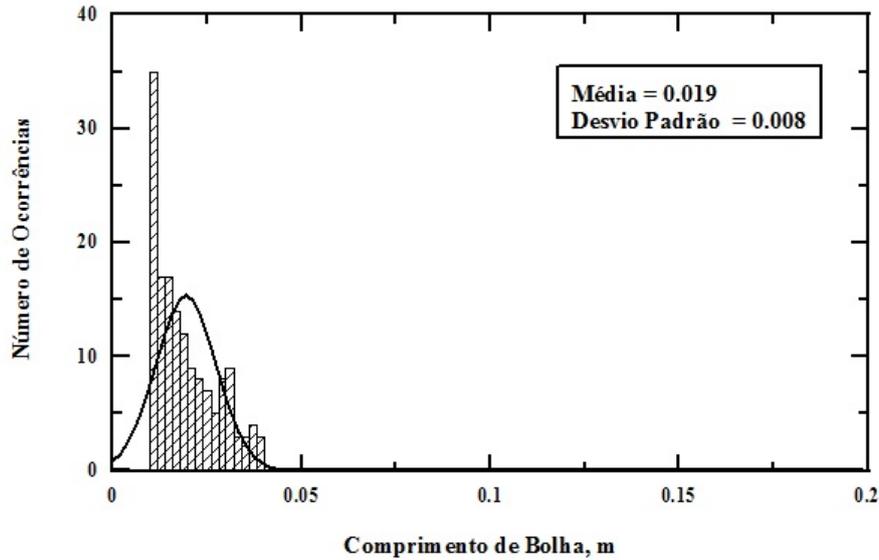


Figura 4.46: Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$

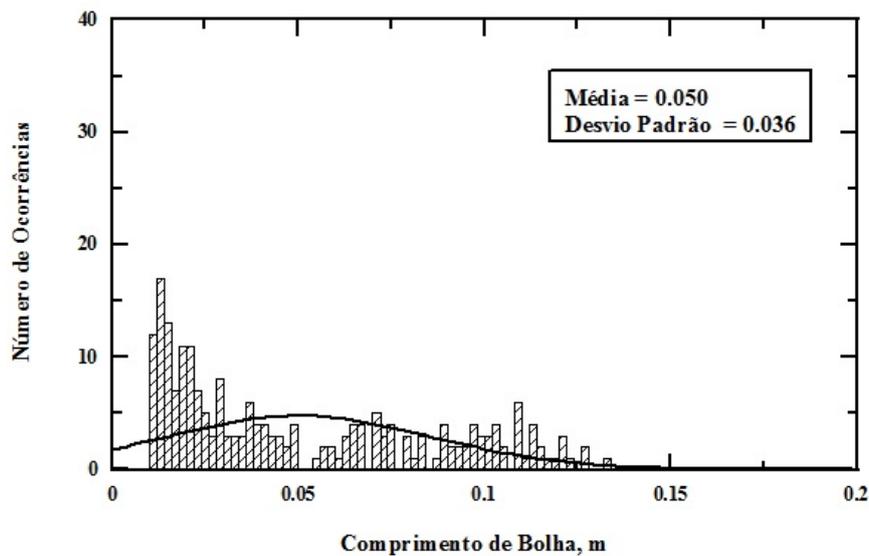


Figura 4.47: Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$

Comprimentos de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$

Os comprimentos de bolhas obtidos pelo processamento dos resultados dos experimentos executados com a aplicação de $P = 0,8 \text{ kW}$, foram organizados em histogramas mostrados nas Figuras 4.51, 4.52, 4.53 e 4.54. Estes experimentos denotam o decréscimo das quantidades de bolhas geradas, em função do aumento da

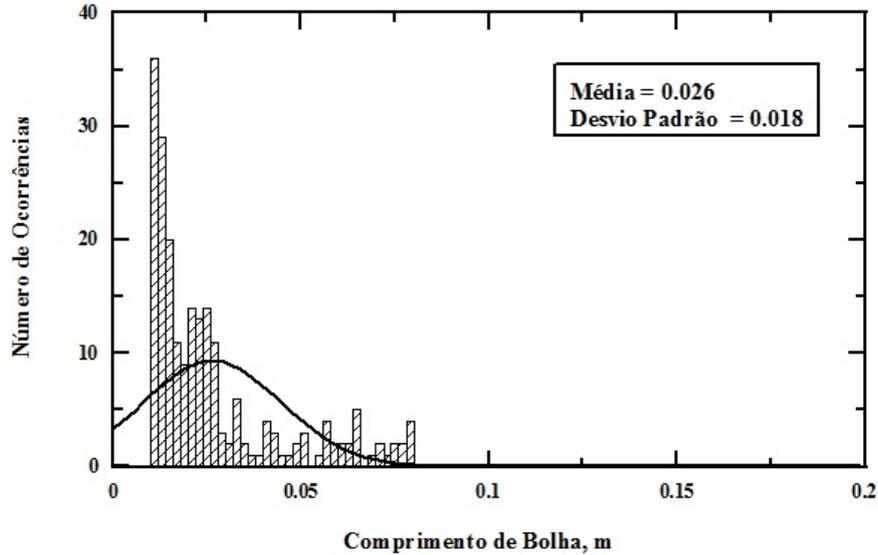


Figura 4.48: Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 0,9$ kW - $Q_s = 6$ l/h

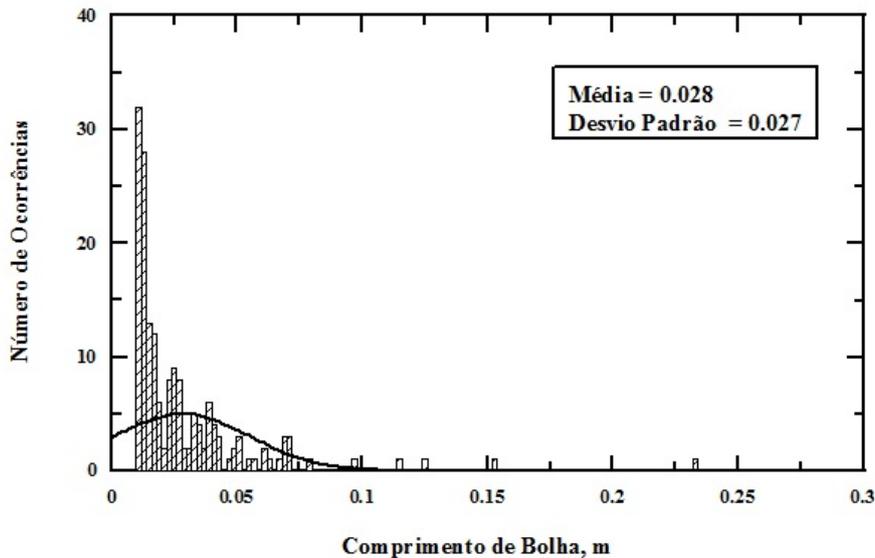


Figura 4.49: Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 0,9$ kW - $Q_s = 9$ l/h

vazão secundária de resfriamento. Os histogramas mostram que os experimentos com $Q_s = 3$ l/h e $Q_s = 6$ l/h apresentam comportamentos semelhantes. Da mesma forma, os experimentos com $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h apresentam, também, comportamentos similares. Os comprimentos das bolhas não ultrapassaram o valor de $7 D$. A curva de distribuição normal do experimento com $Q_s = 3$ l/h apresentou melhor simetria. Os padrões de escoamento identificados foram os do tipo bolhas disper-

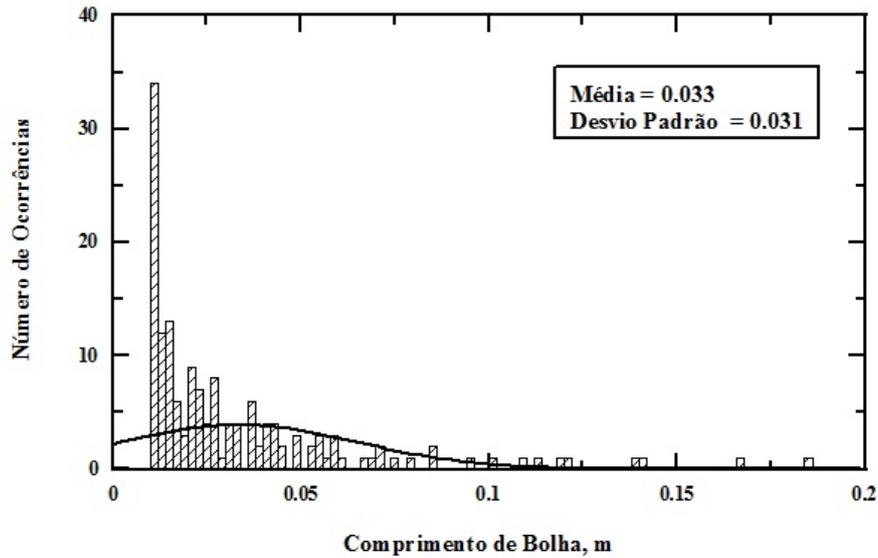


Figura 4.50: Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$ sas, tipo bolhas de Taylor e tipo pistonado. Os diagramas mostram uma tendência de espalhamento dos comprimentos de bolhas, em função do aumento da vazão secundária de resfriamento. A curva de distribuição normal do experimento com $Q_s = 6 \text{ l/h}$ apresentou a assimetria mais acentuada. O experimento com $Q_s = 9 \text{ l/h}$ apresentou maior frequência de quantidades de bolhas. Por seu lado, o experimento com $Q_s = 12 \text{ l/h}$ apresentou maior diversidade nos comprimentos de bolhas.

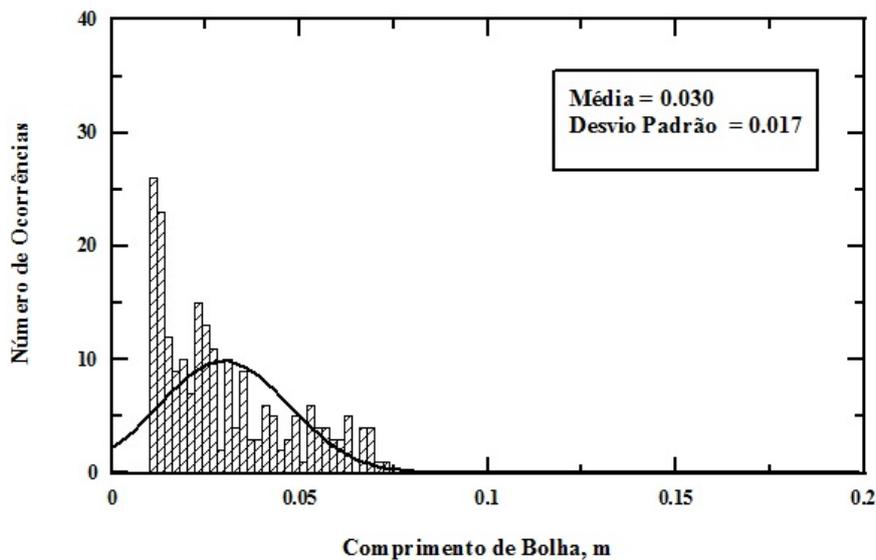


Figura 4.51: Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$

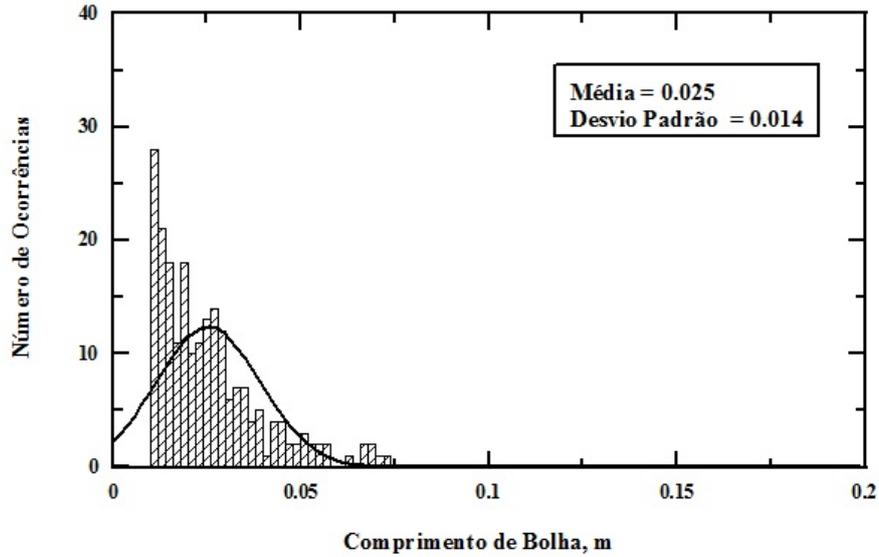


Figura 4.52: Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

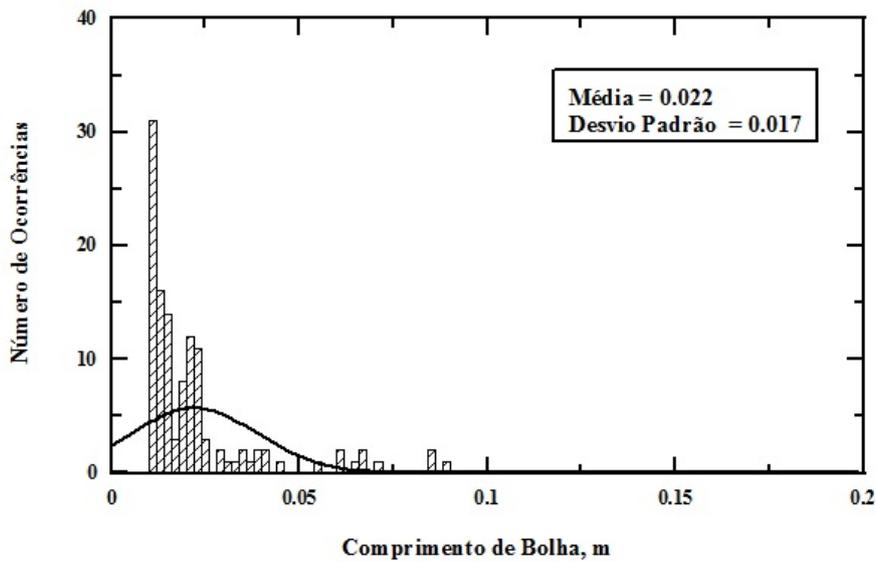


Figura 4.53: Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

4.2.4 Análise dos Histogramas de Comprimentos de Bolhas

Os histogramas de comprimentos de bolhas apresentaram uma distribuição estatística de quantidade de bolhas geradas, conforme mostrado nas Figuras 4.39 a 4.54, contemplando combinações de potências e vazões de resfriamento secundário.

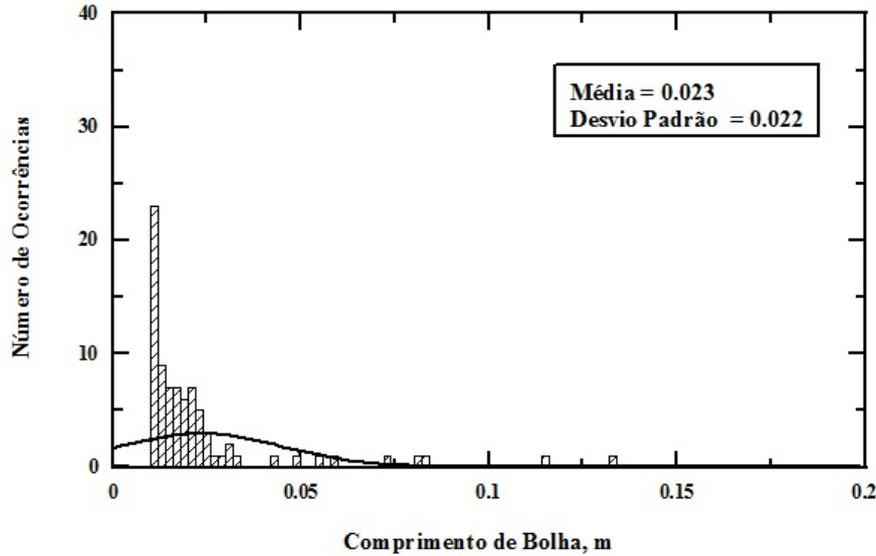


Figura 4.54: Histograma de Comprimentos de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$

Os histogramas mostram as quantidade bolhas em função dos tamanhos das bolhas. Nos comentários estas quantidades são relacionadas com o diâmetro do tubo. O diâmetro do tubo é de $0,020 \text{ m}$. Na análise conjunta das potências aplicáveis nos experimentos, identificou-se que o predomínio na frequência de quantidades de comprimentos de bolhas foi de $Q_s = 9 \text{ l/h}$. A vazão $Q_s = 12 \text{ l/h}$ se destacou em maior diversidade de comprimentos de bolhas e semelhança de padrões com outros experimentos. Para melhor perfil de distribuição de comprimentos de bolhas o predomínio foi de $Q_s = 6 \text{ l/h}$.

4.2.5 Quadro Comparativo de Médias de Comprimentos de Bolhas, para todos os casos

O quadro comparativo da Tabela 4.2, concentra as informações de valores médios de comprimentos de bolhas e desvios padrões, relativos aos experimentos de todos os casos. A primeira informação que se pode extrair é o decréscimo das médias para a potência de $P = 1,1 \text{ kW}$, com as vazões secundárias de $Q_s = 6 \text{ l/h}$, $Q_s = 9 \text{ l/h}$ e $Q_s = 12 \text{ l/h}$. A vazão de $Q_s = 3 \text{ l/h}$ não obedece às tendências verificadas nas outras vazões. A potência de $P = 0,8 \text{ kW}$ segue também um padrão de decréscimo para as vazões de $Q_s = 3 \text{ l/h}$, $Q_s = 6 \text{ l/h}$ e $Q_s = 9 \text{ l/h}$. Na vazão

de $Q_s = 12$ l/h tem-se um leve aumento do valor em relação à vazão menor anterior. Para as demais combinações não foram identificados padrões de comportamento obedecendo à alguma lei de formação.

Tabela 4.2: Médias de Comprimentos de Bolhas, para todos os casos

Q_s	$P11$	$P11$	$P10$	$P10$	$P09$	$P09$	$P08$	$P08$
l/h	$\bar{L}_B(m)$	$d_V(m)$	$\bar{L}_B(m)$	$d_V(m)$	$\bar{L}_B(m)$	$d_V(m)$	$\bar{L}_B(m)$	$d_V(m)$
3	0,035	0,035	0,020	0,009	0,050	0,036	0,030	0,017
6	0,041	0,030	0,032	0,016	0,026	0,018	0,025	0,014
9	0,037	0,022	0,016	0,005	0,028	0,027	0,022	0,017
12	0,034	0,040	0,019	0,008	0,033	0,031	0,023	0,022

4.2.6 Gráfico Comparativo de Médias de Comprimentos de Bolhas versus Vazões Secundárias

A potência $P = 1,1$ kW gerou saída com decréscimo de comprimentos de bolhas com o aumento da vazão, o que representa um resultado coerente em termos de combinações de maior potência com vazões crescentes. A curva do experimento com $P = 0,8$ kW teve tendência de diminuição da média de comprimentos de bolhas, de acordo com o aumento da vazão secundária. Os experimentos com potências de $P = 1,0$ kW e $P = 0,9$ kW não apresentaram padrões que permitam propor análises ou considerações sobre um padrão de comportamento. Para $P = 1,0$ kW as combinações para $Q_s = 3$ l/h apresentaram um valor muito abaixo do esperado. A vazão de $Q_s = 6$ l/h embora não tenha gerado grandes comprimentos de bolhas, a concentração de bolhas em torno da média aumenta o valor desta média. Estes valores estão mostrados no gráfico da Figura 4.55.

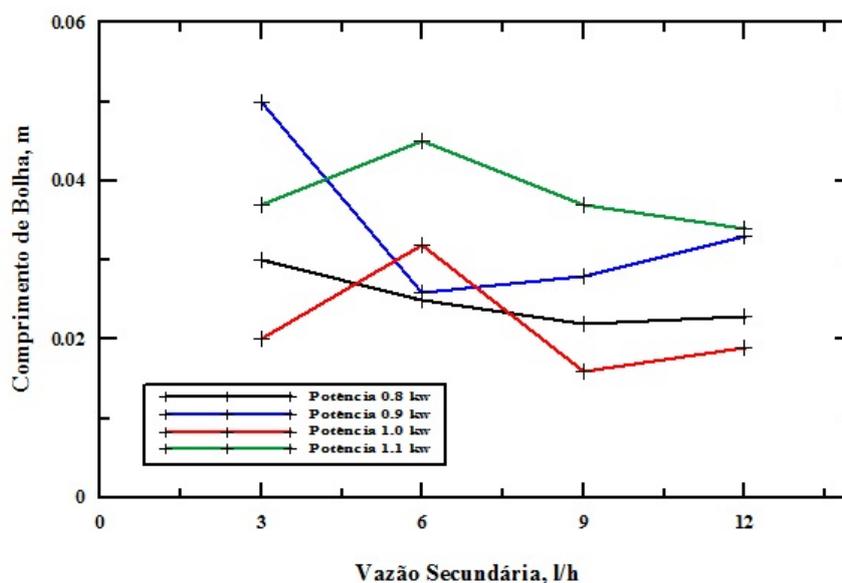


Figura 4.55: Comprimentos de Bolhas versus Vazões Secundárias, para todos os casos

4.2.7 Histogramas de Velocidades de Bolhas, para todos os casos

Os histogramas de velocidades de bolhas proporcionam a análise de comportamentos de todos os casos, combinando potências elétricas e vazões secundárias de resfriamento. Na execução das análises é possível estudar as influências das potências e vazões secundárias, nas forças de sustentação e arraste de bolhas. Os resultados podem ser influenciados também por condições de enchimento, havendo a possibilidade de geração excessiva de vapor, se comparado com condições as normais de volume de líquido em enchimento executado de forma adequada.

Velocidades de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$

Os histogramas de velocidades de bolhas, relativos aos experimentos realizados com a aplicação de $P = 1,1 \text{ kW}$, estão nas Figuras 4.56, 4.57, 4.58 e 4.59. Na análise dos experimentos, notou-se que a $Q_s = 9 \text{ l/h}$ apresentou maior frequência na quantidade de bolhas. O resultado também possibilitou identificar que $Q_s = 3 \text{ l/h}$, apresentou maior diversidade de comprimentos de bolhas. Isto implica em dificuldades para obter-se um perfil de distribuição de velocidade mais adequado,

em razão do espalhamento dos valores. O experimento com $Q_s = 9$ l/h, apresentou melhor perfil de curva de distribuição normal. O experimento com $Q_s = 12$ l/h, apresentou um comportamento similar ao de $Q_s = 6$ l/h. A média de velocidade dos experimentos foi calculada em 0260 m. Os experimentos com $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h apresentaram valores mais próximos da média global.

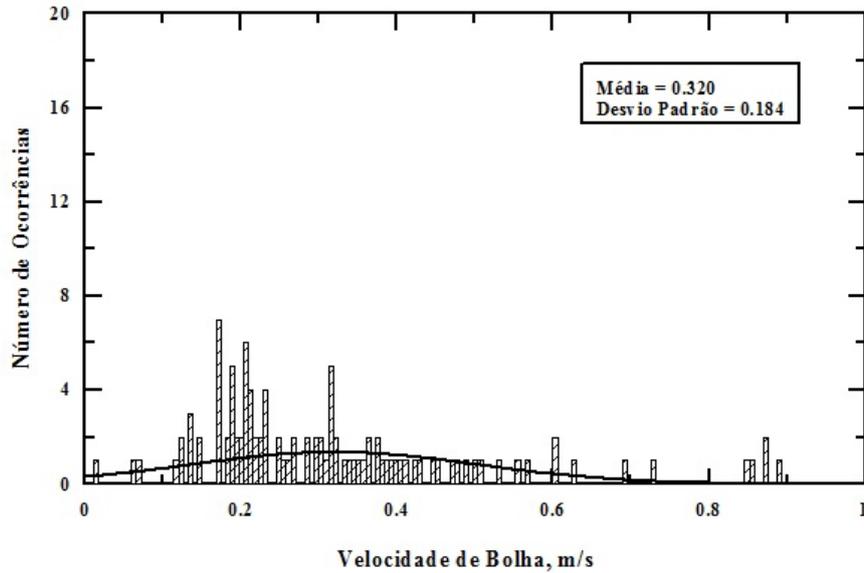


Figura 4.56: Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 3$ l/h

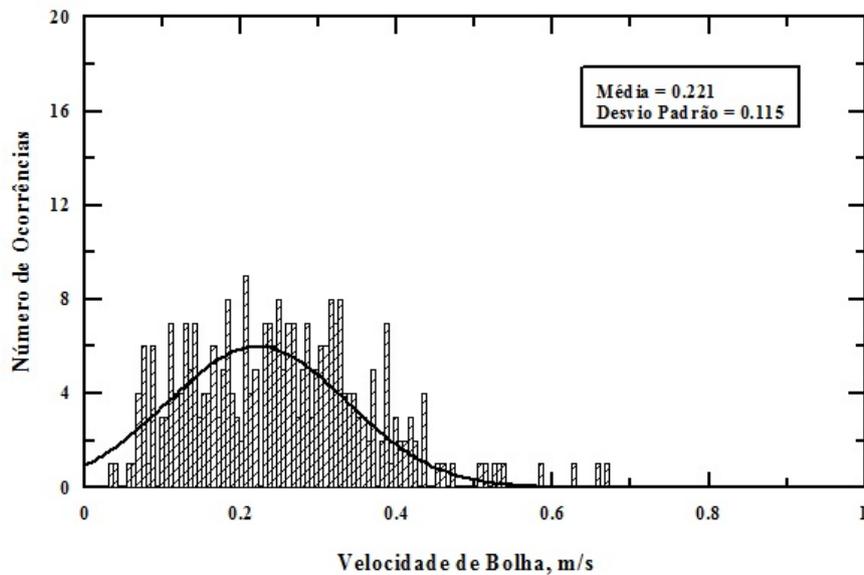


Figura 4.57: Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 6$ l/h

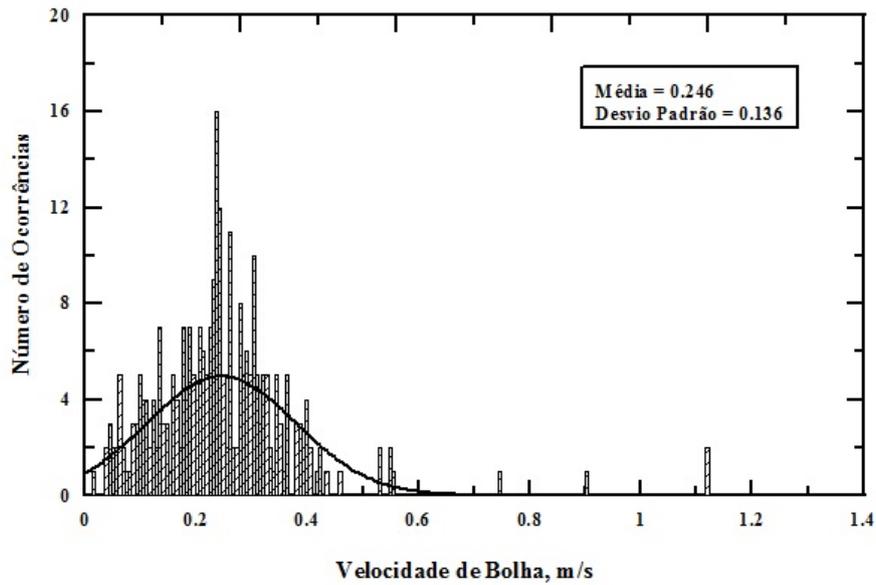


Figura 4.58: Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

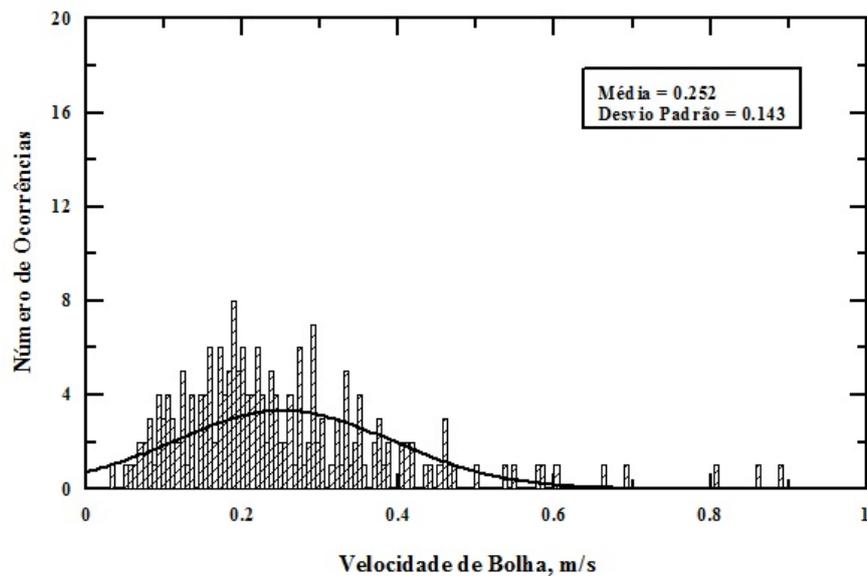


Figura 4.59: Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$

Velocidades de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$

As Figuras 4.60, 4.61, 4.62 e 4.63, representam os histogramas de velocidades de bolhas relativos aos experimentos realizados com a aplicação de $P = 1,0 \text{ kW}$. O experimento utilizando $Q_s = 9 \text{ l/h}$ apresentou melhor desempenho, em relação ao perfil de distribuição de velocidades. O experimento com $Q_s = 6 \text{ l/h}$ apresentou maior frequência de quantidades nos valores velocidades. A curva de distribuição

de velocidades para esta vazão apresentou um perfil mais adequado. A média de velocidade foi calculada em 0,209 m/s. Os valores de velocidades não ultrapassaram o valor de 0,8 m/s. O experimento com $Q_s = 3$ l/h apresentou maior diversidade nos valores de velocidades. Nos histogramas, observa-se que os experimentos com $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h apresentaram comportamentos semelhantes.

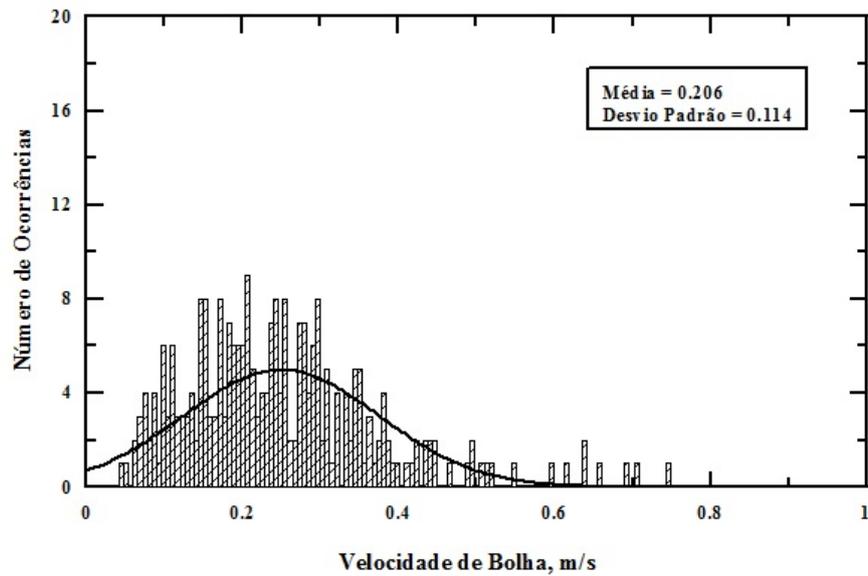


Figura 4.60: Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 1,0$ kW - $Q_s = 3$ l/h

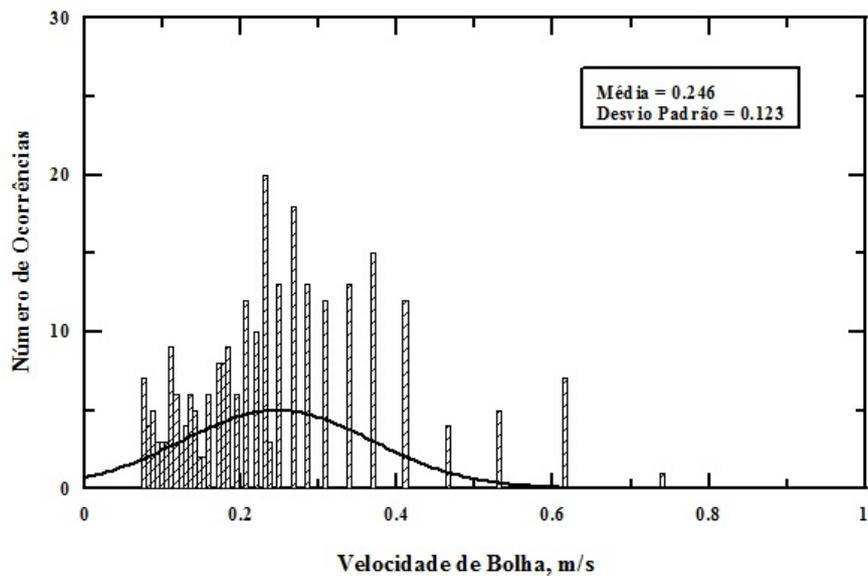


Figura 4.61: Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 1,0$ kW - $Q_s = 6$ l/h

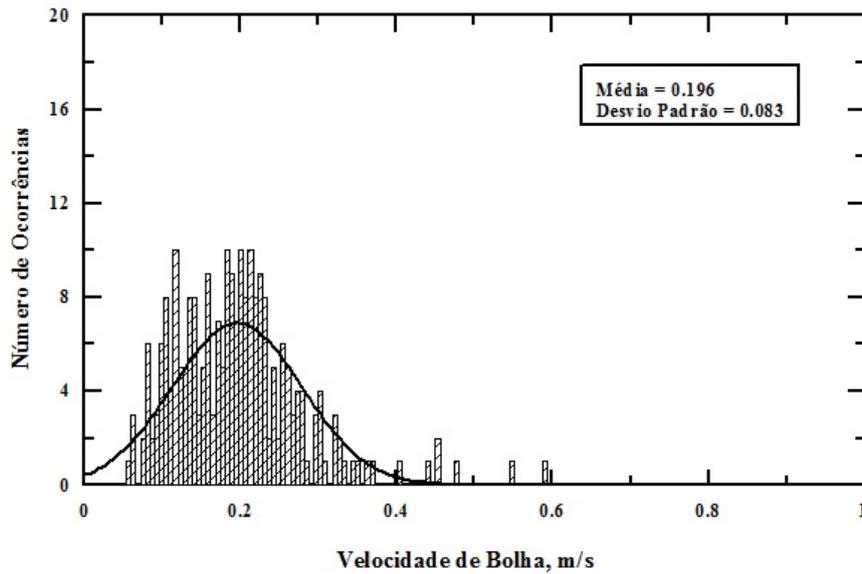


Figura 4.62: Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 1,0$ kW - $Q_s = 9$ l/h

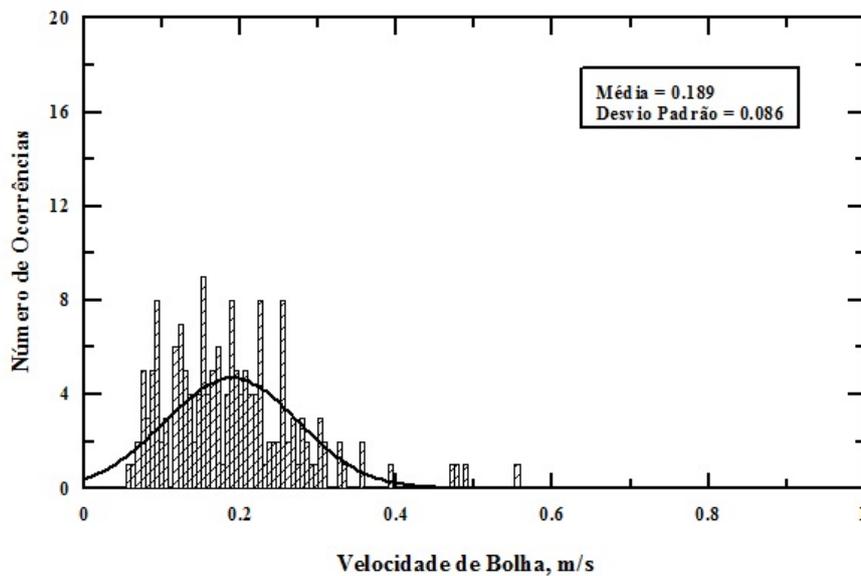


Figura 4.63: Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 1,0$ kW - $Q_s = 12$ l/h

Velocidades de Bolhas - $P = 0,9$ kW

Os histogramas de velocidades de bolhas exibidos nas Figuras 4.64, 4.65, 4.66 e 4.67, representam os resultados processados dos experimentos realizados com a utilização de potência $P = 0,9$ kW. O experimentos com $Q_s = 3$ l/h e $Q_s = 6$ l/h apresentaram comportamentos semelhantes, o mesmo ocorrendo com $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$. Os perfil de distribuição de velocidades para o experimento com

$Q_s = 6$ l/h apresentou melhor padrão e maior frequência de valores de velocidades. O experimento com $Q_s = 3$ l/h apresentou maior diversidade de valores de velocidades. A média de velocidade calculada foi de 0,354 m/s.

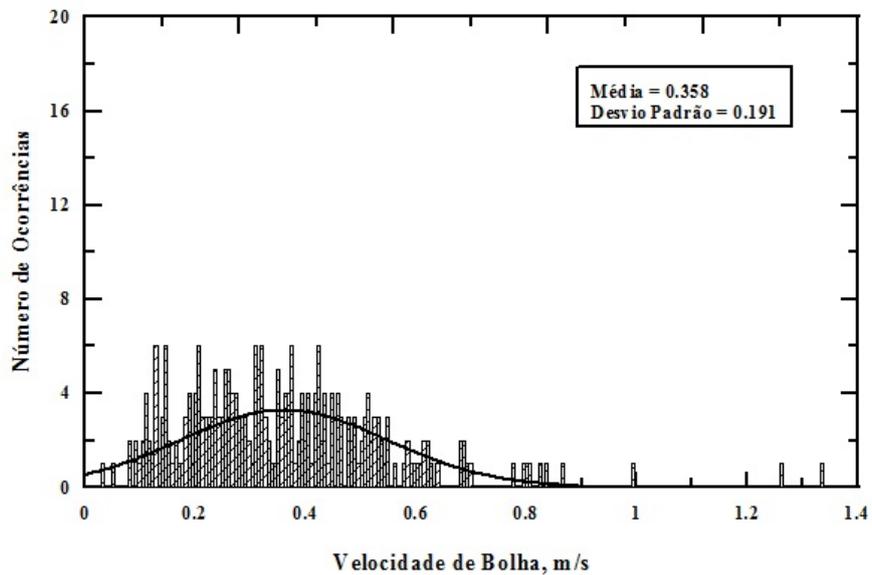


Figura 4.64: Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 0,9$ kW - $Q_s = 3$ l/h

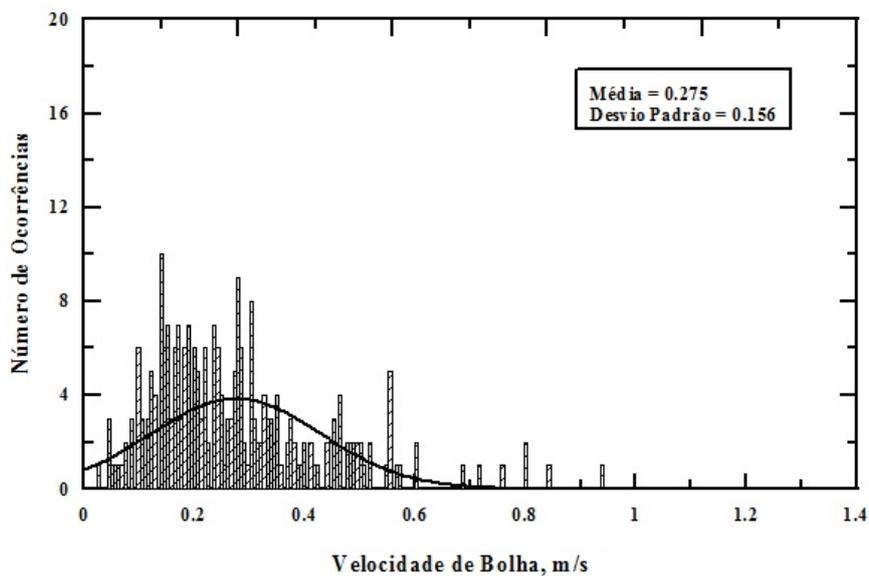


Figura 4.65: Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 0,9$ kW - $Q_s = 6$ l/h

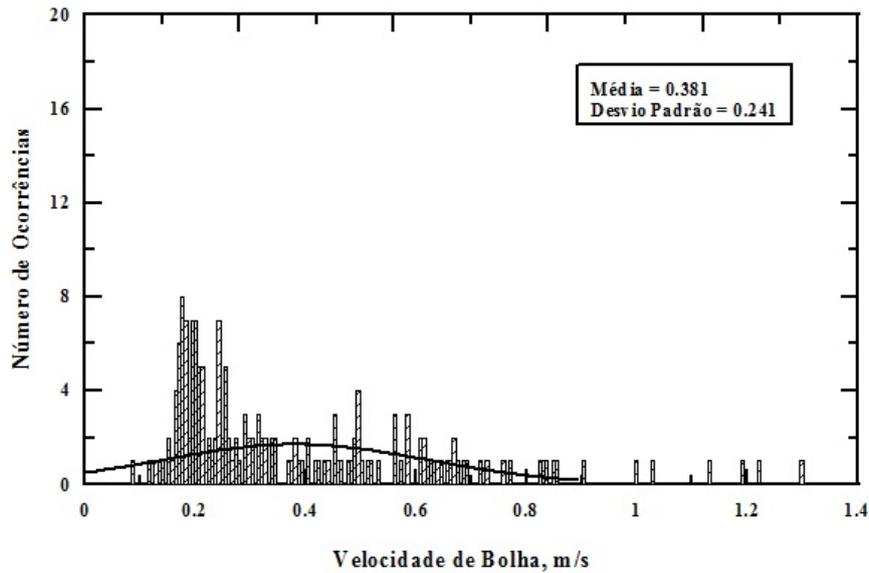


Figura 4.66: Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

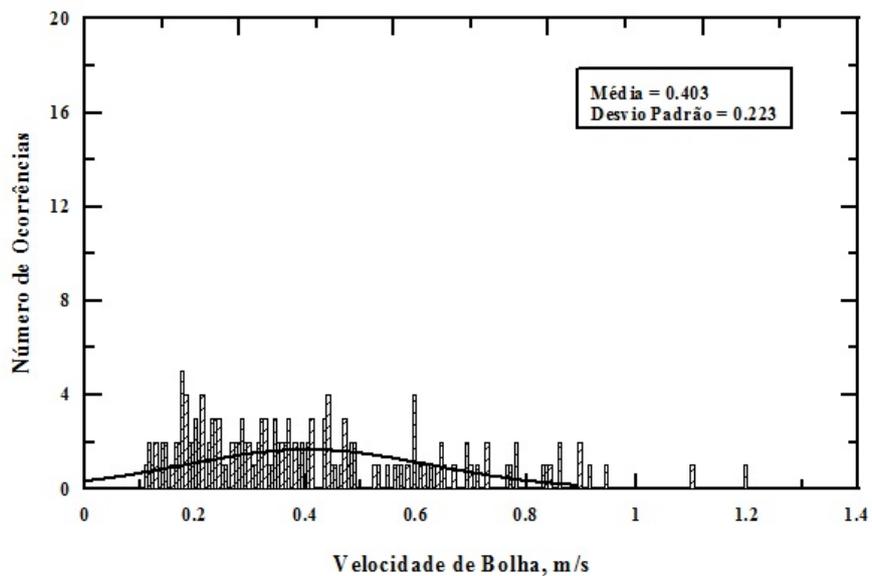


Figura 4.67: Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$

Velocidades de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$

As Figuras 4.64, 4.65, 4.66 e 4.67, representam os histogramas de velocidades de bolhas relativos aos experimentos realizados com a aplicação de $P = 0,8 \text{ kW}$. O experimento com $Q_s = 12 \text{ l/h}$ contempla maior diversidade de valores de velocidades. O experimento com $Q_s = 3 \text{ l/h}$ apresentou maior frequência de valores de velocidades e melhor perfil da curva de distribuição de velocidades. Nota-se que com o aumento

da vazão secundária ocorre a diminuição da frequência e manutenção da variedade de valores de velocidades. No experimento com maior vazão secundária tem-se um espalhamento dos valores. Isto implica em uma curva de distribuição de velocidade com perfil indesejável. A redução de quantidade de bolhas é função do aumento da vazão secundária, o que era esperado. A média de velocidade foi calculada em 0,270 m/s. Os experimentos com $Q_s = 3$ l/h e $Q_s = 6$ l/h apresentaram mesmo padrão de comportamento.

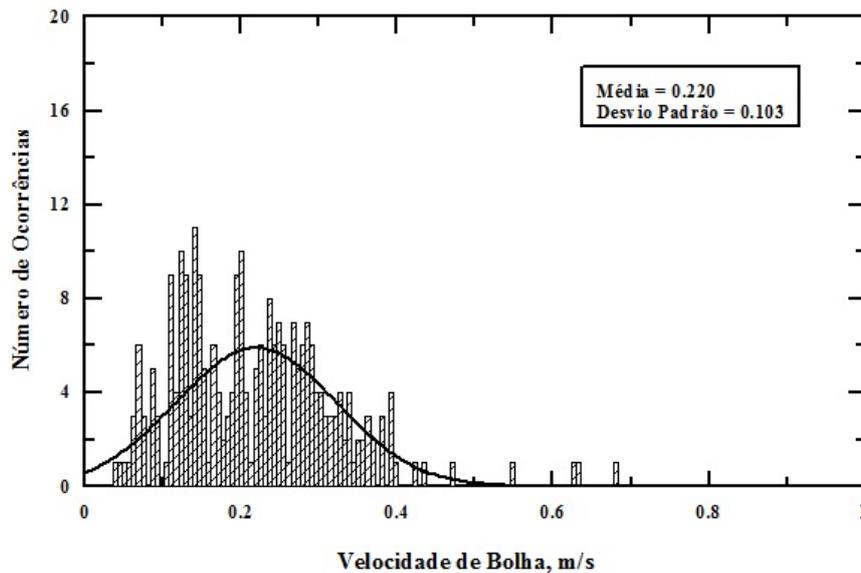


Figura 4.68: Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 3$ l/h

4.2.8 Análise dos Histogramas de Velocidades de Bolhas

Os histogramas de velocidades de bolhas apresentam uma distribuição estatística de quantidade de bolhas geradas, conforme mostrado nas Figuras 4.56 a 4.71, contemplando combinações de potências e vazões de resfriamento secundário. Os histogramas mostram a distribuição estatística dos eventos. Os histogramas mostram as velocidades de bolhas em função das quantidades de bolhas. Na análise conjunta das potências aplicáveis nos experimentos, identificou-se que o predomínio na frequência de quantidades de comprimentos de bolhas foi de $Q_s = 6$ l/h. A vazão $Q_s = 3$ l/h se destacou em maior diversidade de comprimentos de bolhas, as vazões de $Q_s = 3$ l/h e $Q_s = 6$ l/h, aparecem com mais frequência na semelhança de padrões

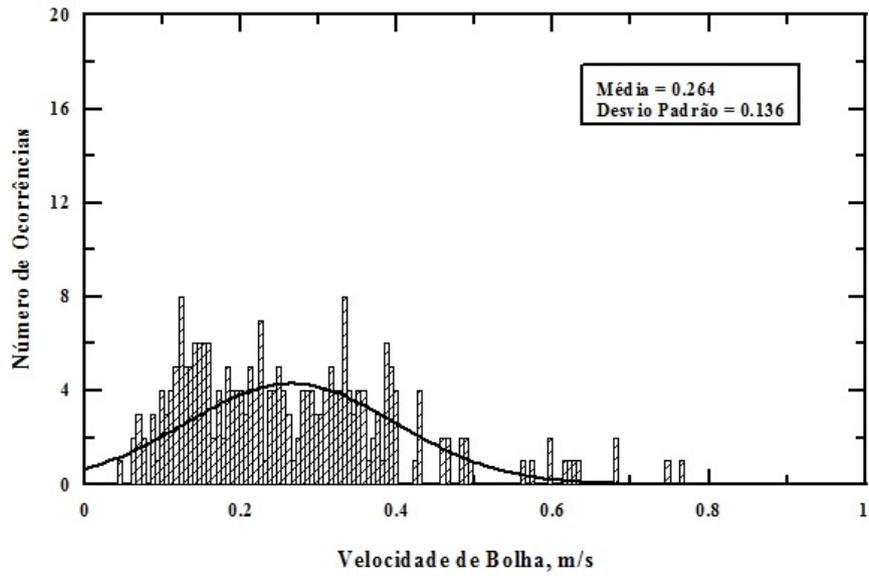


Figura 4.69: Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

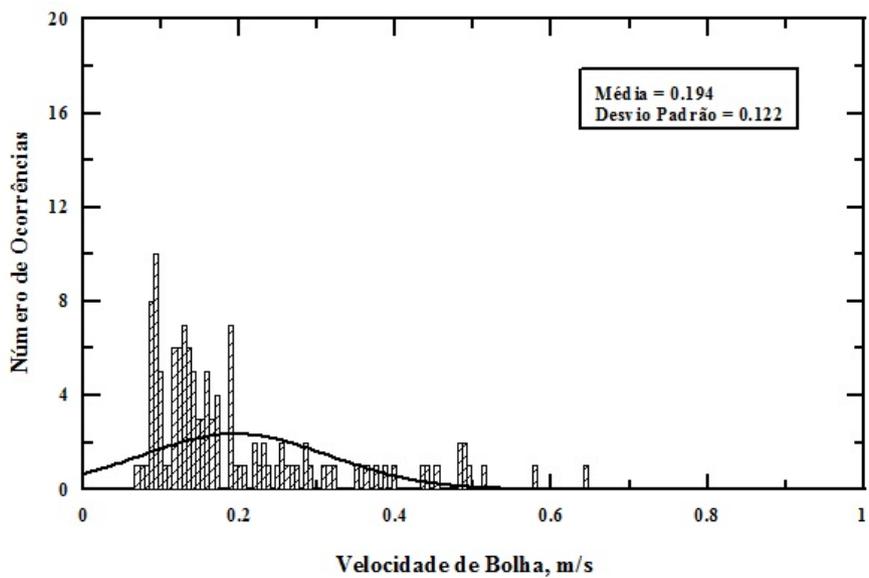


Figura 4.70: Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

com outros experimentos. Para melhor perfil de distribuição de comprimentos de bolhas o predomínio foi de $Q_s = 9 \text{ l/h}$.

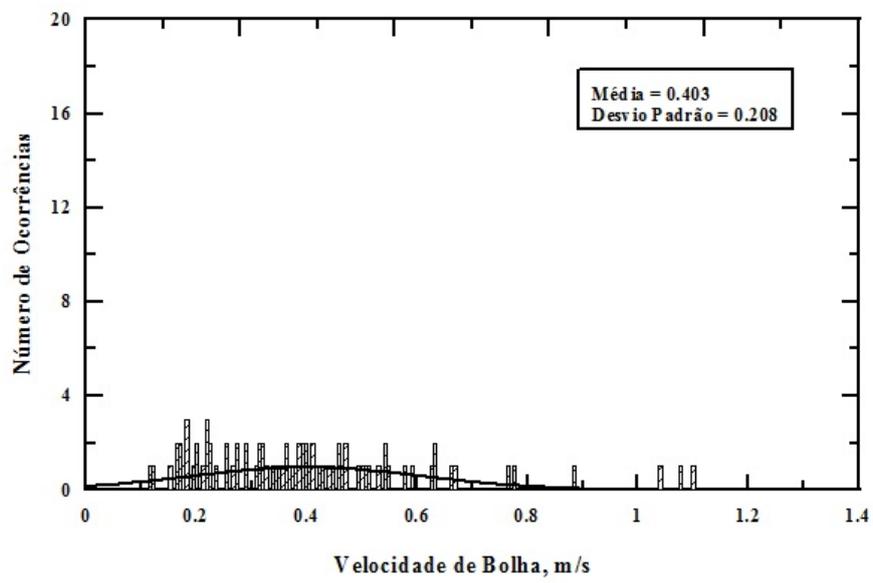


Figura 4.71: Histograma de Velocidades de Bolhas - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 12$ l/h

4.2.9 Quadro Comparativo de Velocidades de Bolhas, para todos os casos

O quadro comparativo da Tabela 4.3, apresenta os dados das informações de valores médios de comprimentos de bolhas e desvios padrões, relativos aos experimentos de todos os casos. Estes experimentos não conseguem refletir, ao contrário dos comprimentos de bolhas, as velocidades não conseguem em nenhum momento, retratar uma lei de formação ou estabelecer correspondências entre os resultados.

Tabela 4.3: Médias de Velocidades de Bolhas, para todos os casos

Q_s	$P11$	$P11$	$P10$	$P10$	$P09$	$P09$	$P08$	$P08$
l/h	$\bar{V}_B(m)$	$d_V(m)$	$\bar{V}_B(m)$	$d_V(m)$	$\bar{V}_B(m)$	$d_V(m)$	$\bar{V}_B(m)$	$d_V(m)$
3	0,320	0,184	0,206	0,114	0,358	0,191	0,220	0,103
6	0,221	0,115	0,246	0,123	0,275	0,156	0,264	0,136
9	0,246	0,136	0,196	0,083	0,381	0,241	0,194	0,122
12	0,252	0,143	0,189	0,086	0,403	0,223	0,403	0,208

4.2.10 Gráfico Comparativo de Velocidades de Bolhas versus Vazões Secundárias

Neste panorama, conforme apresentado no gráfico da Figura 4.72, as vazões com $Q_s = 3$ l/h e $Q_s = 6$ l/h mostram que as potências não tiveram influência relevante na geração de quantidade de bolhas, visto que as quantidades são bastante similares para todas as vazões. O resultado para a potência $P = 1,1$ kW não acompanhou esta tendência. Entretanto, pode ser notado que para a vazão $Q_s = 6$ l/h tem-se o início da tendência da influência dos valores de potências nas quantidades de bolhas. Para as vazões de $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h, as potências passam a ter uma influência mais decisiva nas quantidades de bolhas.

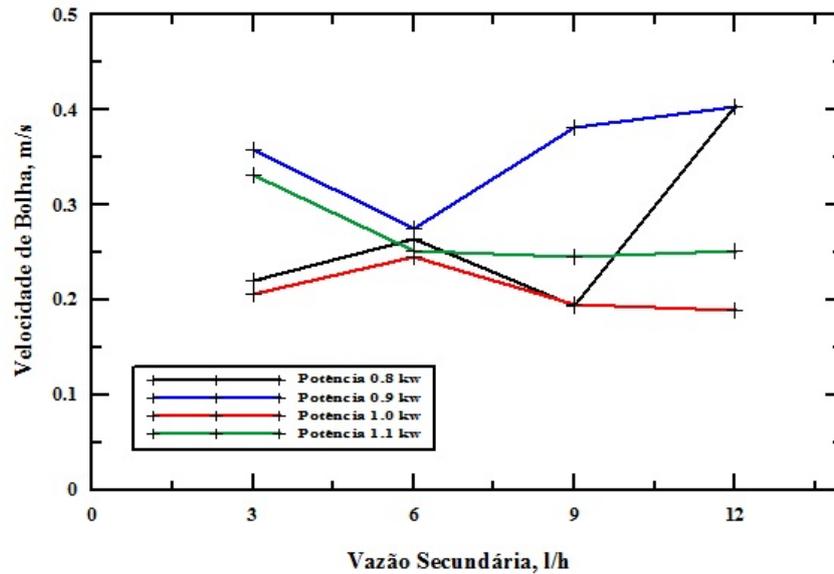


Figura 4.72: Velocidades de Bolhas versus Vazões Secundárias

4.2.11 Médias e Desvios Padrões de Comprimentos de Bolhas e Velocidades de Bolhas

As médias e desvios padrões dos experimentos estão mostrados nas Tabelas 4.4 a 4.7, sintetizando todas as informações utilizadas para as análises individuais dos casos. Estas tabelas permitem a visualização global dos dados resultantes do processamento dos valores dos parâmetros das bolhas.

Médias de Comprimentos de Bolhas e Velocidades de Bolhas - $P = 1,1$ kW

Os valores médios de comprimentos e velocidades de bolha estão apresentados nas tabelas 4.4, para a potência $P = 1,1$ kW, combinada com as vazões de resfriamento secundário $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h. No caso de $P = 1,1$ kW e $Q_s = 3$ l/h, foi identificado um menor número de bolhas para o mesmo tempo de aquisição de dados, devido a ocorrência de escoamento agitado, o que impediu as medições dos comprimentos e velocidades de bolhas.

Tabela 4.4: Médias de Comprimentos de Bolhas e Velocidades de Bolhas - $P = 1,1$ kW

Q_s (l/h)	N_B	\bar{L}_B (m)	d_V (m)	\bar{V}_B (m/s)	d_V (m/s)
3	138	0,035	0,035	0,320	0,184
6	289	0,041	0,030	0,221	0,115
9	282	0,037	0,022	0,246	0,136
12	198	0,034	0,040	0,252	0,143

Médias de Comprimentos de Bolhas e Velocidades de Bolhas - $P = 1,0$ kW

Os valores médios de comprimento e velocidade de bolha estão apresentados nas tabelas 4.5, para a potência $P = 1,0$ kW, combinada com as vazões de resfriamento secundário $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h.

Tabela 4.5: Médias de Comprimentos de Bolhas e Velocidades de Bolhas - $P = 1,0$ kW

Q_s (l/h)	N_B	\bar{L}_B (m)	d_V (m)	\bar{V}_B (m/s)	d_V (m/s)
3	263	0,020	0,009	0,206	0,114
6	259	0,032	0,016	0,246	0,123
9	239	0,016	0,005	0,196	0,083
12	168	0,019	0,008	0,189	0,086

Médias de Comprimentos de Bolhas e Velocidades de Bolhas - $P = 0,9$ kW

Os valores médios de comprimento e velocidade de bolha estão apresentados nas tabelas 4.6, para a potência $P = 0,9$ kW combinada com as vazões de resfriamento secundário $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h.

Tabela 4.6: Médias de Comprimentos de Bolhas e Velocidades de Bolhas - $P = 0,9$ kW

Q_s (l/h)	N_B	\bar{L}_B (m)	d_V (m)	\bar{V}_B (m/s)	d_V (m/s)
3	260	0,050	0,036	0,358	0,191
6	250	0,026	0,018	0,275	0,156
9	171	0,028	0,027	0,381	0,241
12	155	0,033	0,031	0,403	0,223

Médias de Comprimentos de Bolhas e Velocidades de Bolhas - $P = 0,8$ kW

Os valores médios de comprimento e velocidade de bolha estão apresentados nas tabelas 4.7, para a potência $P = 0,8$ kW, combinada com as vazões de resfriamento secundário $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h.

Tabela 4.7: Médias de Comprimentos de Bolhas e Velocidades de Bolhas - $P = 0,8$ kW

Q_s (l/h)	N_B	\bar{L}_B (m)	d_V (m)	\bar{V}_B (m/s)	d_V (m/s)
3	254	0,030	0,017	0,220	0,103
6	244	0,025	0,014	0,264	0,136
9	121	0,022	0,017	0,194	0,122
12	82	0,023	0,022	0,403	0,208

4.2.12 Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas, para todos os casos

As correlações entre comprimentos de bolhas e velocidades de bolhas estão mostradas nas Figuras 4.73 a 4.88, engloba todas as combinações envolvendo potências e vazões secundárias. As correlações não se apresentam fortes, em razão das velocidades de bolhas não apresentarem padrões de comportamentos, que pudessem seguir os padrões de comprimentos de bolhas com ocorrência de comportamentos mais concentrados em torno de um valor de referência.

Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 1,1 \text{ kW}$

As correlações entre as velocidades e comprimentos de bolhas são mostradas nas Figuras 4.73, 4.74, 4.75 e 4.76, com aplicação de $P = 1,1 \text{ kW}$ e vazões secundárias de resfriamento de $Q_s = 3 \text{ l/h}$, $Q_s = 6 \text{ l/h}$, $Q_s = 9 \text{ l/h}$ e $Q_s = 12 \text{ l/h}$. Os experimentos com $Q_s = 6 \text{ l/h}$ e $Q_s = 12 \text{ l/h}$ apresentaram mesmo padrão de comportamento e maior diversidade de valores de velocidades. Os experimentos realizados com $Q_s = 6 \text{ l/h}$ e $Q_s = 9 \text{ l/h}$ apresentaram maior frequência de quantidade de valores de velocidades. Os experimentos com $Q_s = 3 \text{ l/h}$, $Q_s = 6 \text{ l/h}$ e $Q_s = 9 \text{ l/h}$ apresentaram coeficientes angulares semelhantes nas retas de correlações.

Tabela 4.8: Equação de Ajuste de Correlação - $P = 1,1 \text{ kW}$

$Q_s \text{ (l/h)}$	N_B	Termo "a"	Termo "b"
3	138	1,239	0,216
6	289	1,413	0,175
9	282	0,668	0,215
12	198	1,867	0,177

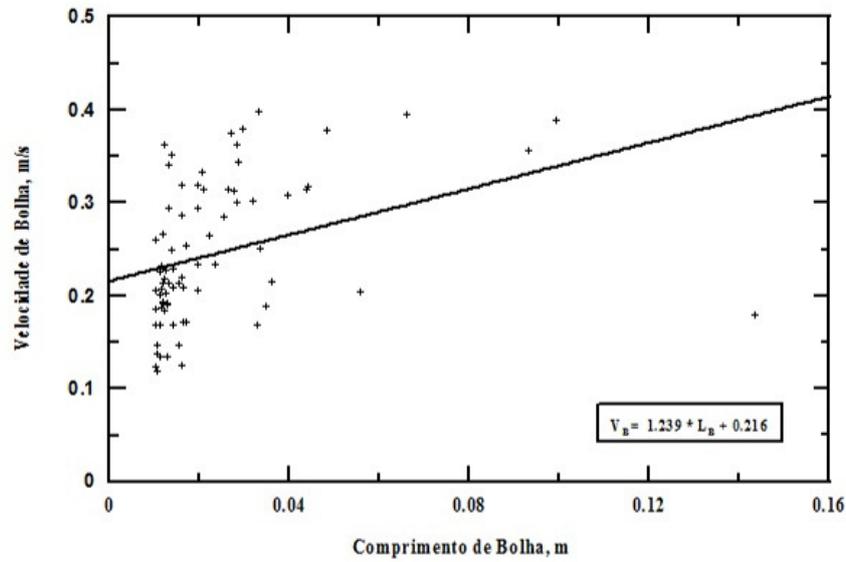


Figura 4.73: Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas
 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$

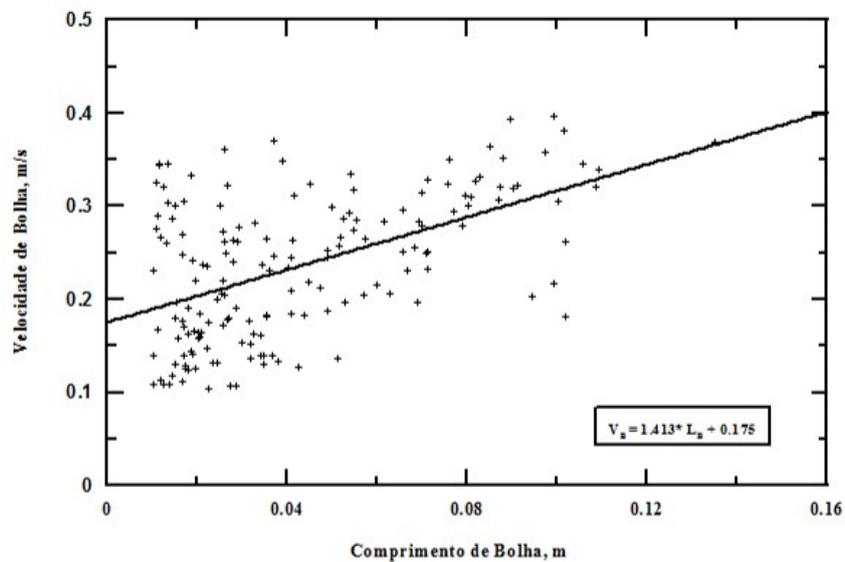


Figura 4.74: Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas
 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$

As correlações entre as velocidades e comprimentos de bolhas são mostradas nas Figuras 4.73, 4.74, 4.75 e 4.76, com aplicação de $P = 1,0 \text{ kW}$ e vazões se-

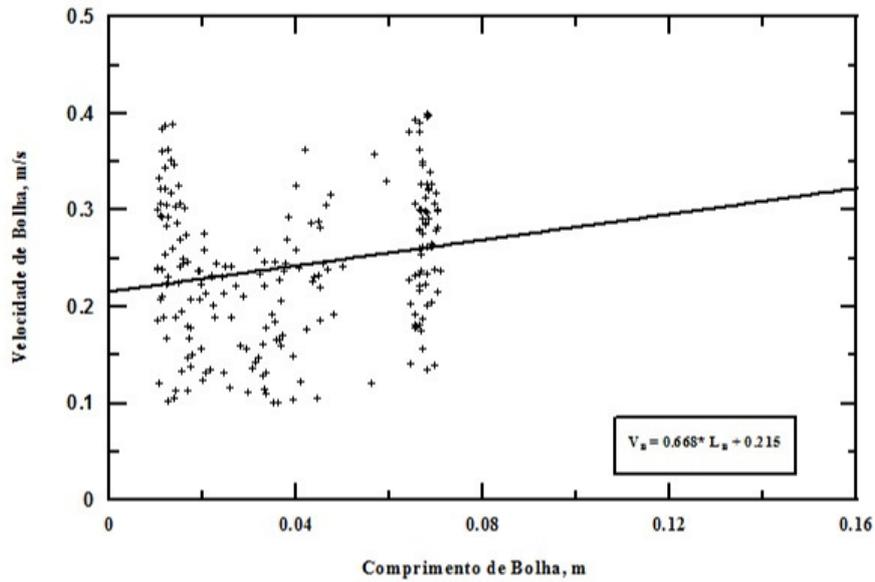


Figura 4.75: Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas
 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

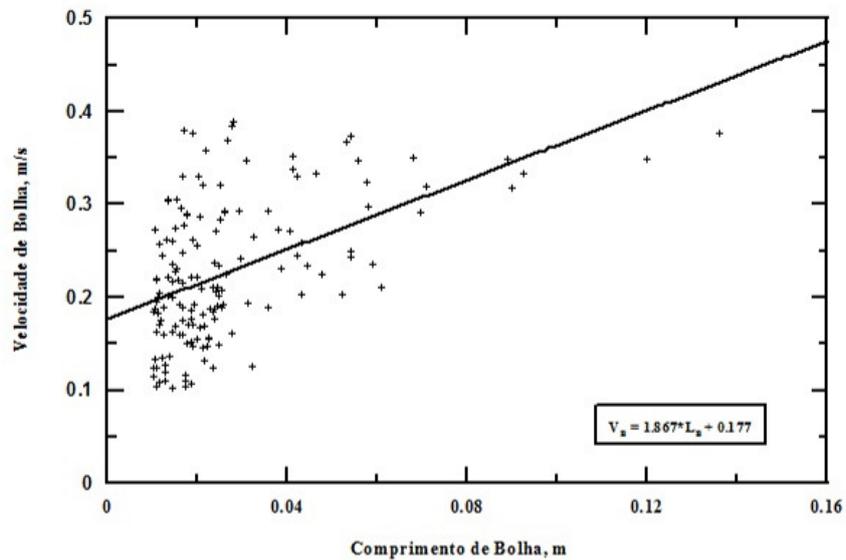


Figura 4.76: Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas
 - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$

cundárias de resfriamento de $Q_s = 3 \text{ l/h}$, $Q_s = 6 \text{ l/h}$, $Q_s = 9 \text{ l/h}$ e $Q_s = 12 \text{ l/h}$.
 Os experimentos com os pares de vazões, $Q_s = 3 \text{ l/h}$ e $Q_s = 6 \text{ l/h}$, e $Q_s = 9 \text{ l/h}$

e $Q_s = 12$ l/h, apresentaram mesmos padrões de comportamento, mesmas diversidades de valores de velocidades e mesmas frequências de quantidades de velocidades. Os experimentos com $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h, apresentaram coeficientes angulares semelhantes nas retas de correlações.

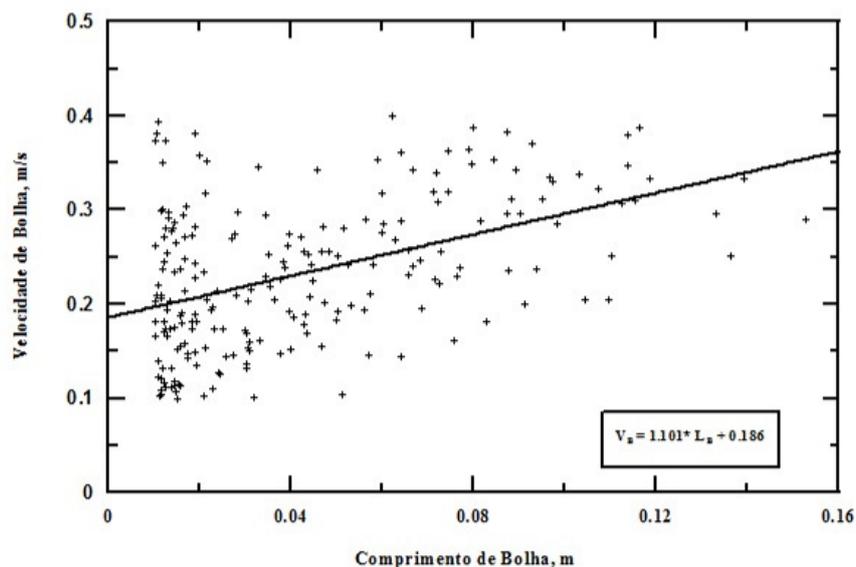


Figura 4.77: Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas
- $P = 1,0$ kW - $Q_s = 3$ l/h

Tabela 4.9: Equação de Ajuste de Correlação - $P = 1,0$ kW

Q_s (l/h)	N_B	Termo "a"	Termo "b"
3	263	1,101	0,186
6	259	1,465	0,147
9	239	1,544	0,158
12	168	1,400	0,167

Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 0,9$ kW

As correlações entre as velocidades e comprimentos de bolhas são mostradas nas Figuras 4.73, 4.74, 4.75 e 4.76, com aplicação de $P = 0,9$ kW e vazões se-

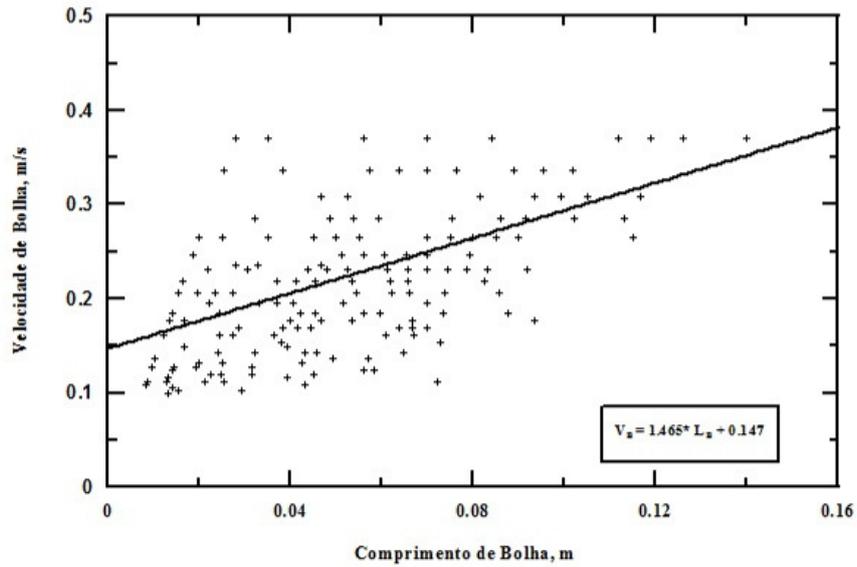


Figura 4.78: Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas
 - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

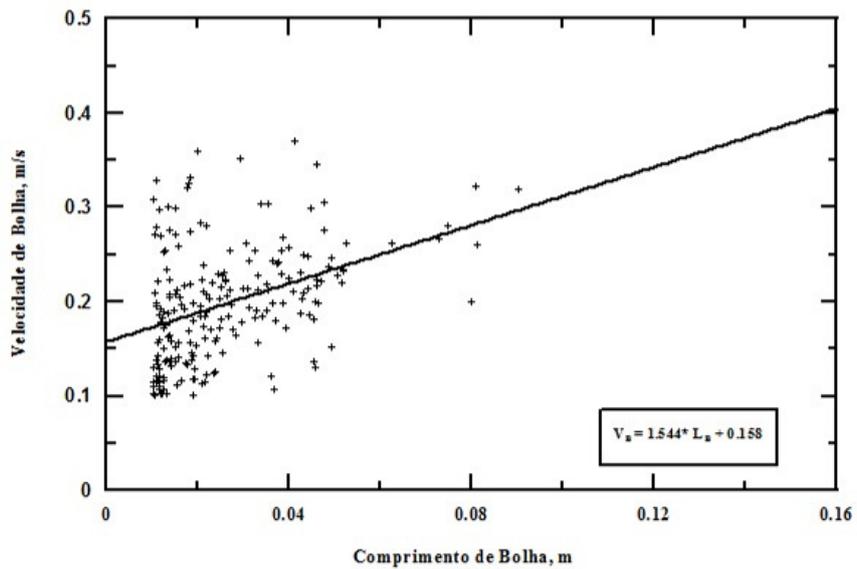


Figura 4.79: Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas
 - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

cundárias de resfriamento de $Q_s = 3 \text{ l/h}$, $Q_s = 6 \text{ l/h}$, $Q_s = 9 \text{ l/h}$ e $Q_s = 12 \text{ l/h}$.
 Os experimentos com os pares de vazões, $Q_s = 3 \text{ l/h}$ e $Q_s = 6 \text{ l/h}$, e $Q_s = 9 \text{ l/h}$

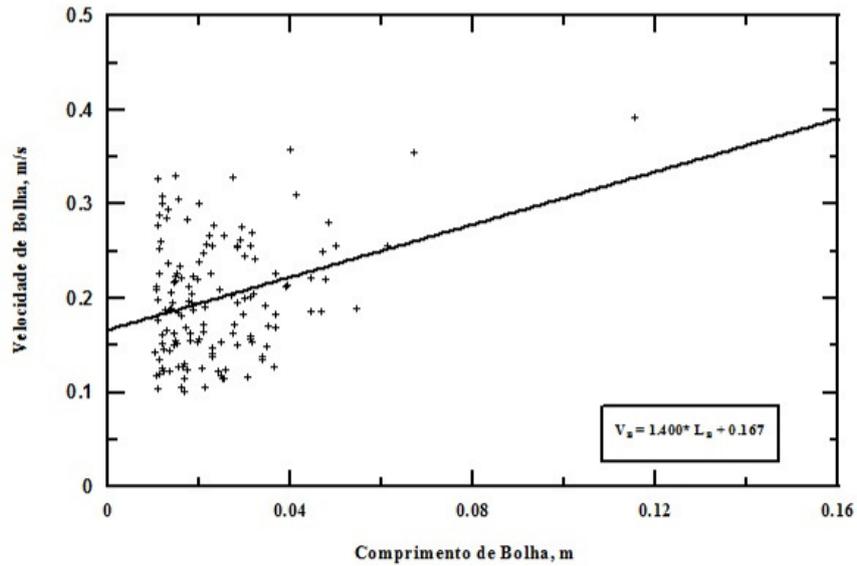


Figura 4.80: Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$

e $Q_s = 12 \text{ l/h}$, apresentaram mesmos padrões de comportamento, mesmas diversidades de valores de velocidades, mesmas frequências de quantidades de velocidades e mesmos coeficientes angulares semelhantes nas retas de correlações.

Tabela 4.10: Equação de Ajuste de Correlação - $P = 0,9 \text{ kW}$

Q_s (l/h)	N_B	Termo "a"	Termo "b"
3	260	0,577	0,225
6	250	0,657	0,208
9	171	4,644	0,159
12	155	3,503	0,185

Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas - $P = 0,8 \text{ kW}$

As correlações entre as velocidades e comprimentos de bolhas são mostradas nas Figuras 4.73, 4.74, 4.75 e 4.76, com aplicação de $P = 0,9 \text{ kW}$ e vazões secundárias de resfriamento de $Q_s = 3 \text{ l/h}$, $Q_s = 6 \text{ l/h}$, $Q_s = 9 \text{ l/h}$ e $Q_s = 12 \text{ l/h}$.

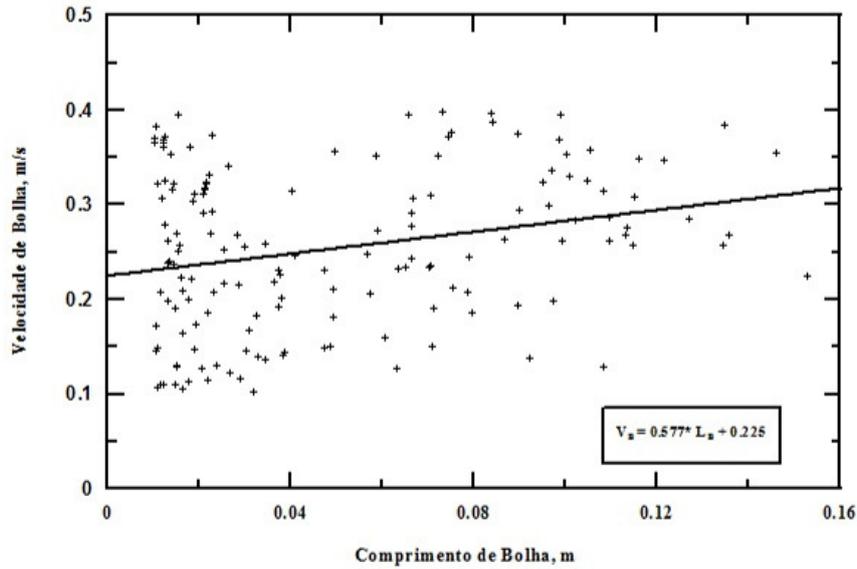


Figura 4.81: Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas
 - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$

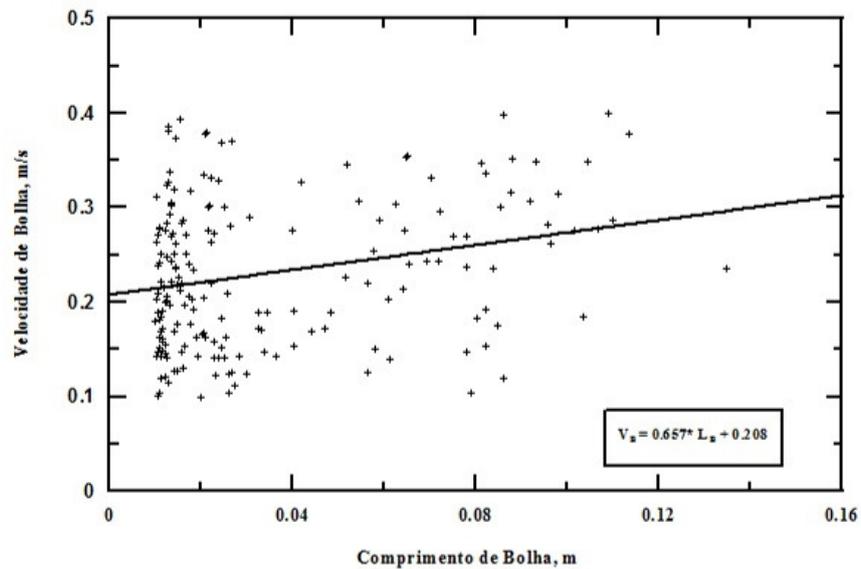


Figura 4.82: Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas
 - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

Os experimentos com os pares de vazões, $Q_s = 3 \text{ l/h}$ e $Q_s = 6 \text{ l/h}$, e $Q_s = 9 \text{ l/h}$ e $Q_s = 12 \text{ l/h}$, apresentaram semelhanças nos padrões de comportamento, nas diversi-

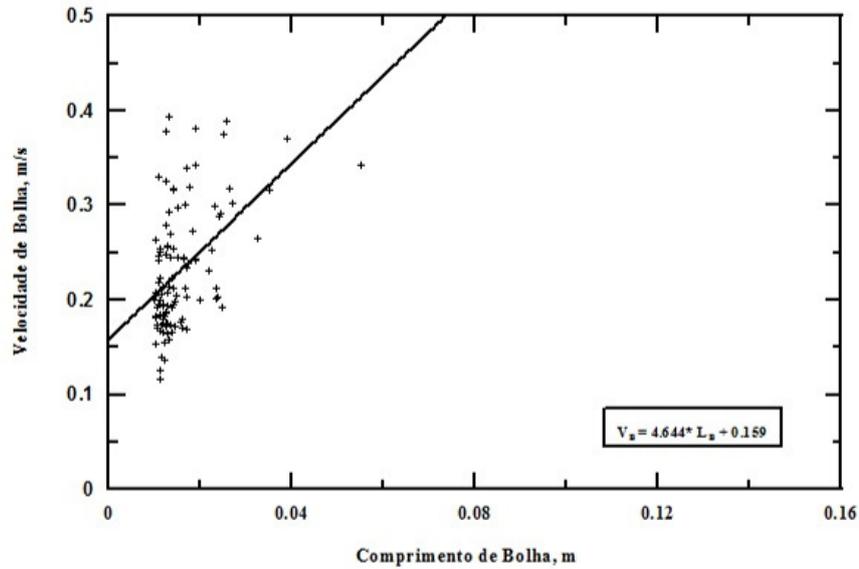


Figura 4.83: Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas
 - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

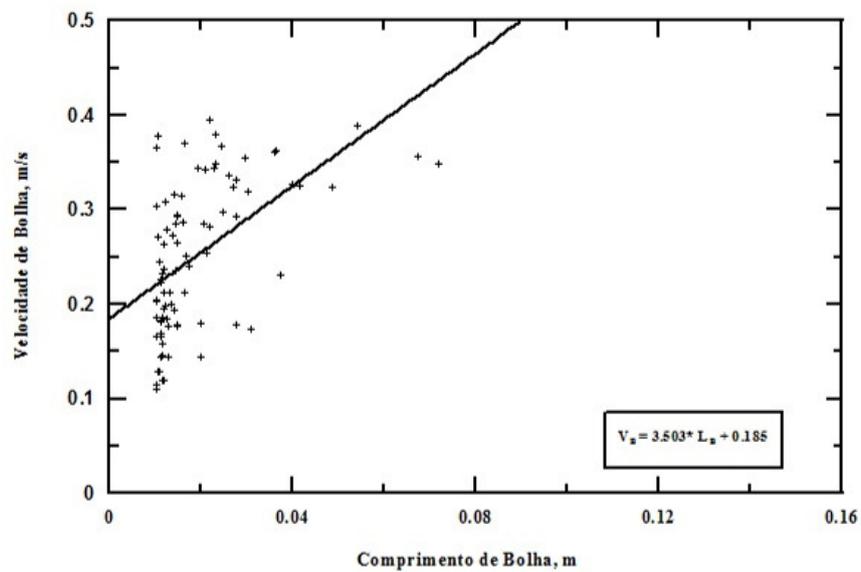


Figura 4.84: Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas
 - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$

dades de valores de velocidades, nas frequências de quantidades de velocidades e nos coeficientes angulares nas retas de correlações entre comprimentos e velocidades.

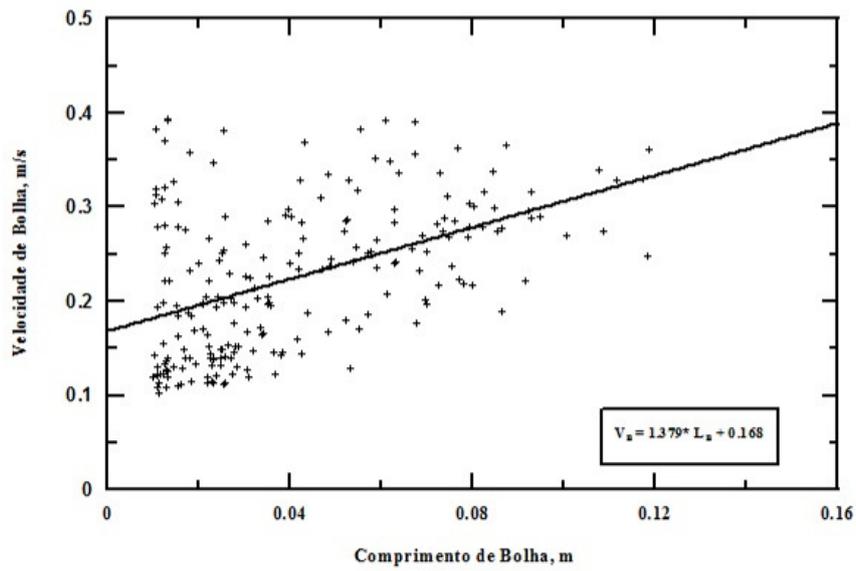


Figura 4.85: Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas
 - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$

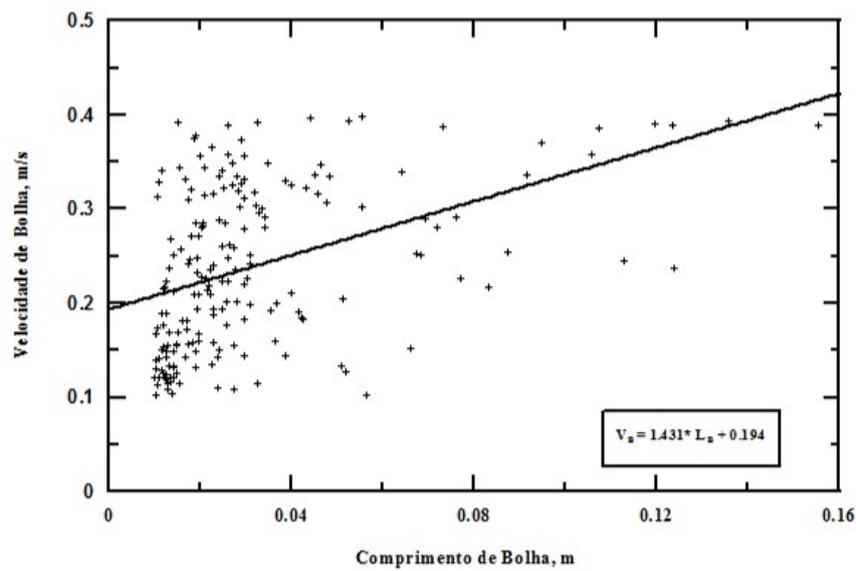


Figura 4.86: Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas
 - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

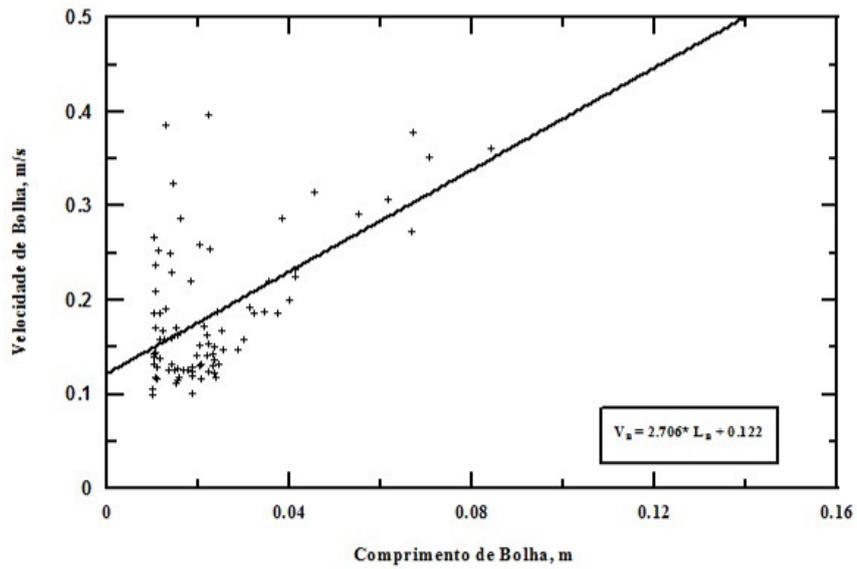


Figura 4.87: Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas
 - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

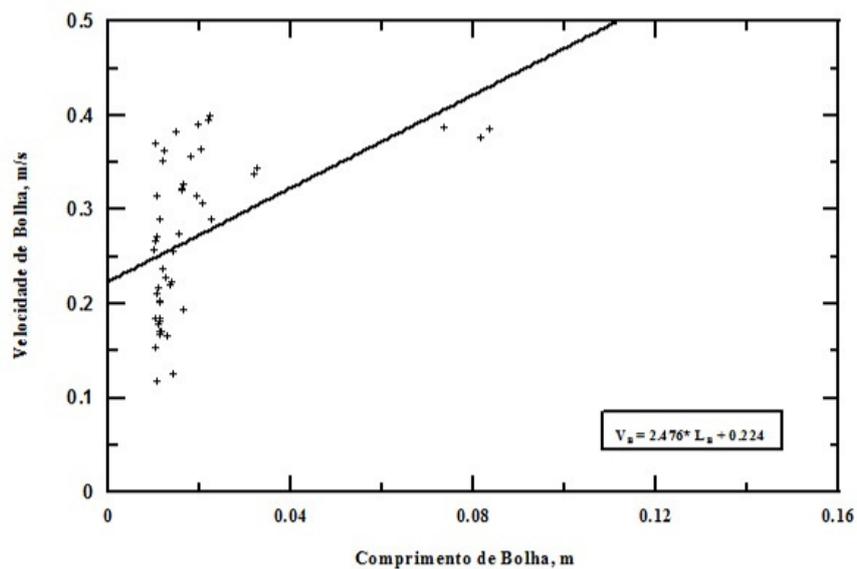


Figura 4.88: Correlações de Comprimentos de Bolhas versus Velocidades de Bolhas
 - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$

Tabela 4.11: Equação de Ajuste de Correlação - $P = 0,8$ kW

Q_s (l/h)	N_B	Termo "a"	Termo "b"
3	254	1,379	0,168
6	244	1,431	0,194
9	121	2,706	0,122
12	82	2,476	0,224

4.2.13 Estudos de Casos dos Experimentos

Os estudos de compreendem a apresentação de casos específicos, sendo realizado a primeiro exemplo, com imagens de bolhas obtidas com câmera de alta velocidade e seus perfis obtidos por aquisição e processamento de sinais ultrassônicos. Os cálculos dos parâmetros das bolhas estão detalhados na seção correspondente.

Em outra situação tem-se imagens de bolhas, processamentos de imagens com geração de perfis de bolhas, além das equações referentes aos diâmetros das bolhas em função dos perfis citados.

Para verificação do comportamento do circuito de circulação natural, tem-se medições de temperaturas na perna quente, bem como comparações destas mesmas temperaturas com as temperaturas na perna fria.

As medições de vazões na perna fria com medidor de vazão eletromagnético, permitem a comparação das combinações de potência-vazão secundária.

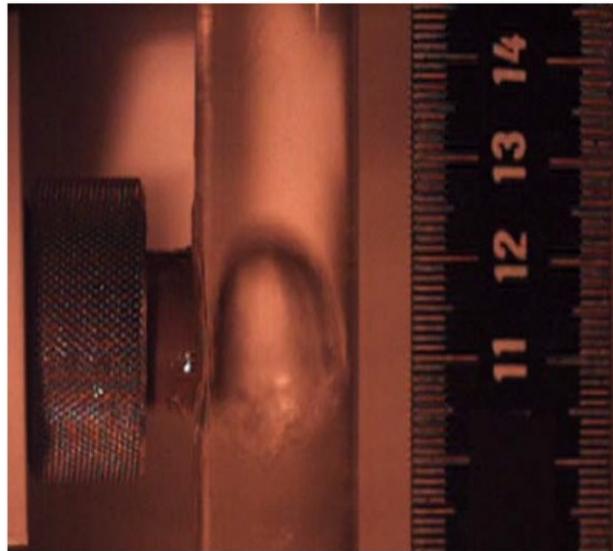
As medições de temperaturas entre a saída do aquecedor e o plenum inferior permitem observar a geração de calor agregado ao circuito, considerando o trajeto do fluido da perna fria para a perna quente.

4.2.14 Aquisições de Imagens e Perfis Ultrassônicos de Bolhas

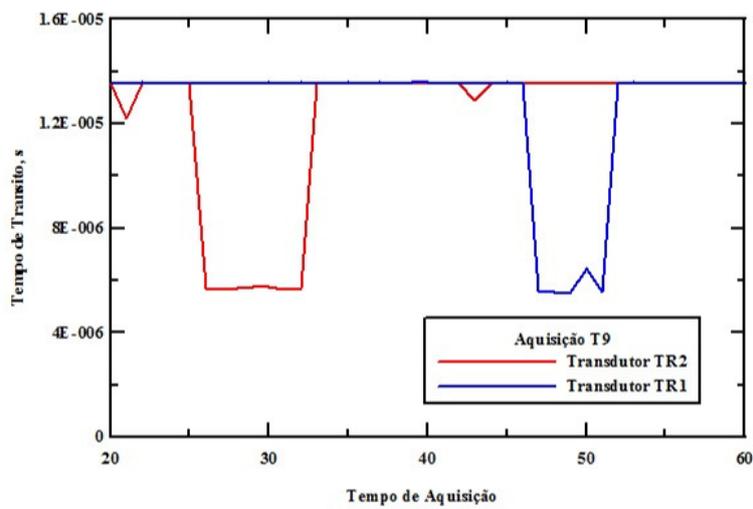
As imagens e perfis ultrassônicos de bolhas são mostradas nas Figuras 4.89 a 4.116, para a condição de experimento executado com a aplicação de potência elétrica de $P = 1,1$ kW e a vazão de resfriamento secundário de $Q = 9$ l/h. A aquisição T9 foi escolhida para o estudo de caso para o cálculo dos parâmetros interfaciais. As aquisições foram utilizadas para cálculo de velocidade e comprimento de bolhas, conforme mostrado nas Tabelas 4.12 a 4.39.

As comparações entre as imagens referem-se à passagem das bolhas pela seção transparente da perna quente. As imagens geradas pela câmera de alta velocidade e as aquisições de sinais pelos transdutores ultrassônicos foram obtidos, simultaneamente, em um intervalo de tempo pré-definido de 60 segundos para a aquisição dos dados. As aquisições perfazem um total de 3.170 aquisições de sinais ultrassônicos,

dentro do intervalo de tempo definido para aquisição dos dados.



(a)

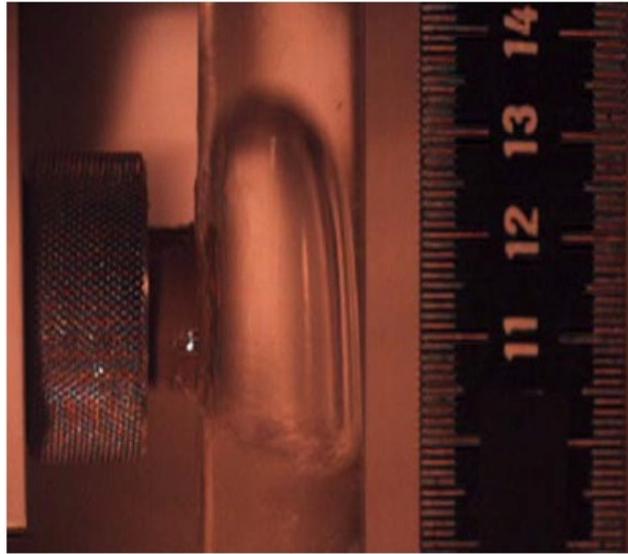


(b)

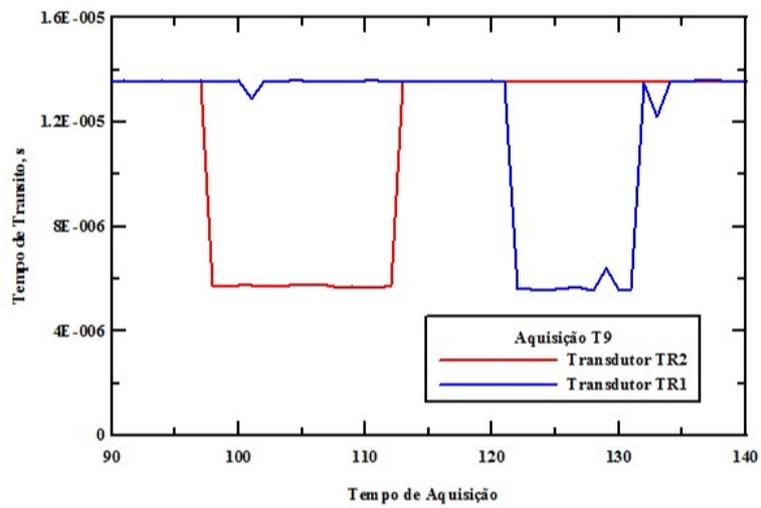
Figura 4.89: Bolha 1 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.12: Parâmetros da Bolha 1

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
1	25	31	46	50	1	6	2



(a)

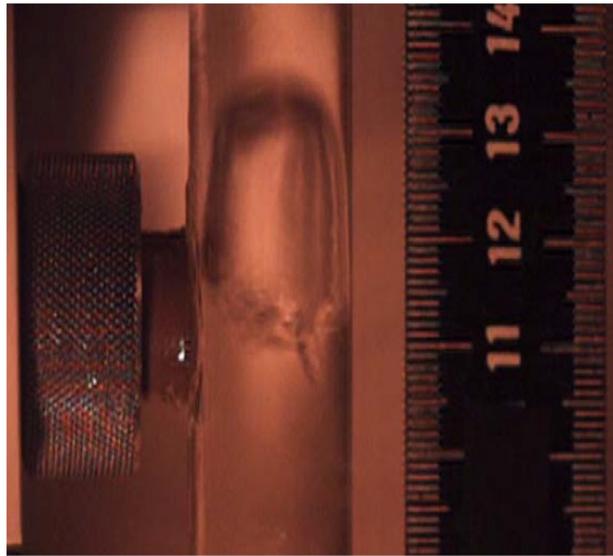


(b)

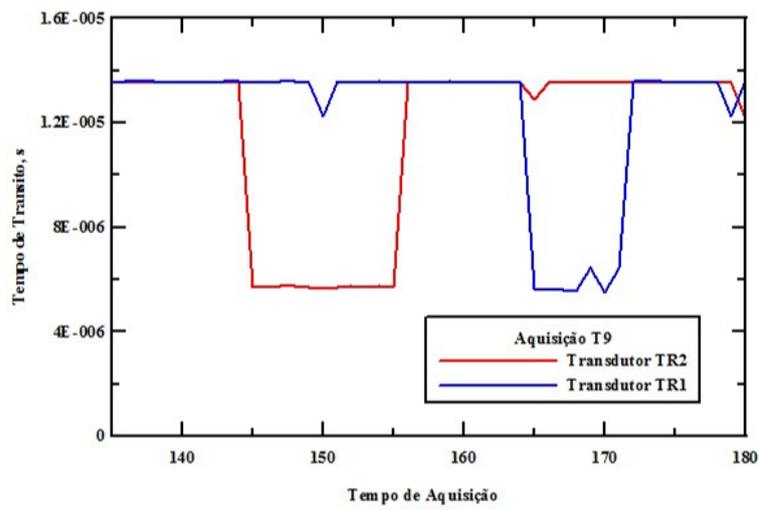
Figura 4.90: Bolha 2 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.13: Parâmetros da Bolha 2

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
2	97	111	121	130	1	14	2



(a)

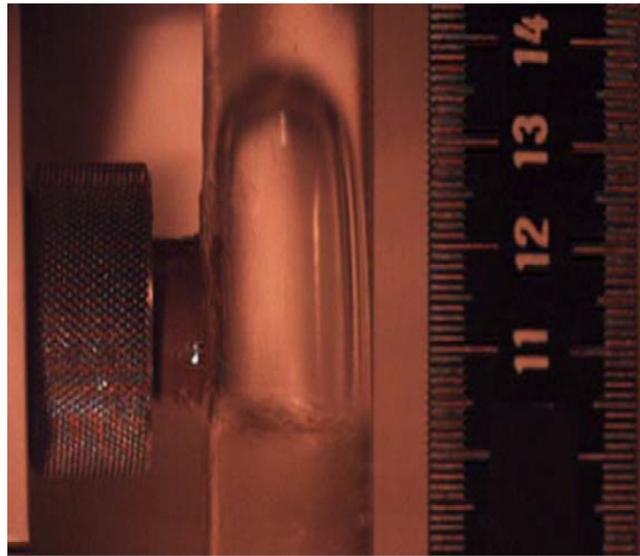


(b)

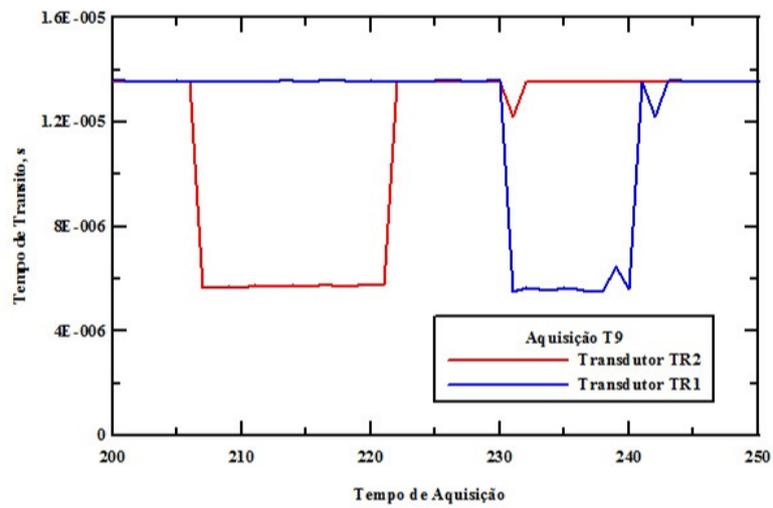
Figura 4.91: Bolha 3 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.14: Parâmetros da Bolha 3

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
3	144	154	164	170	1	10	2



(a)

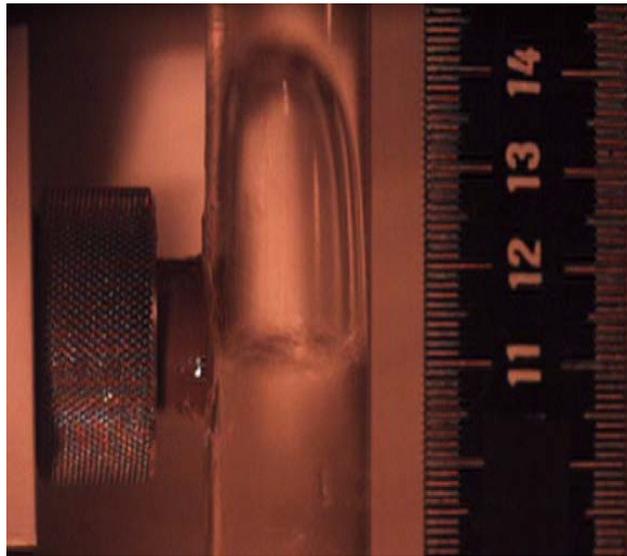


(b)

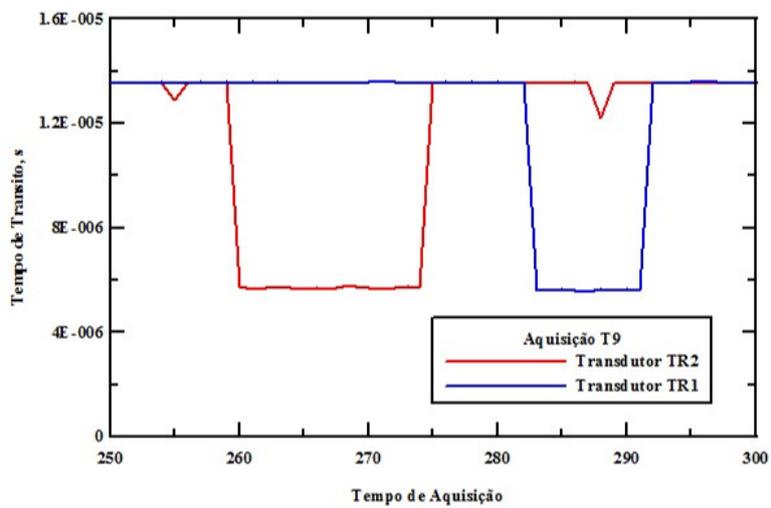
Figura 4.92: Bolha 4 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.15: Parâmetros da Bolha 4

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
4	206	220	230	239	1	14	2



(a)

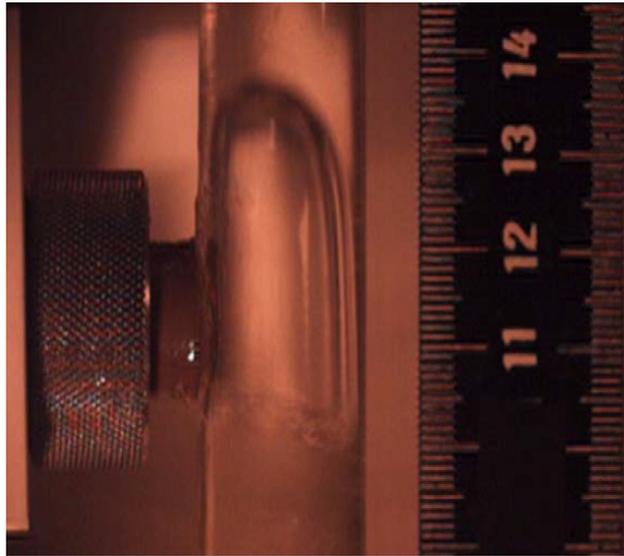


(b)

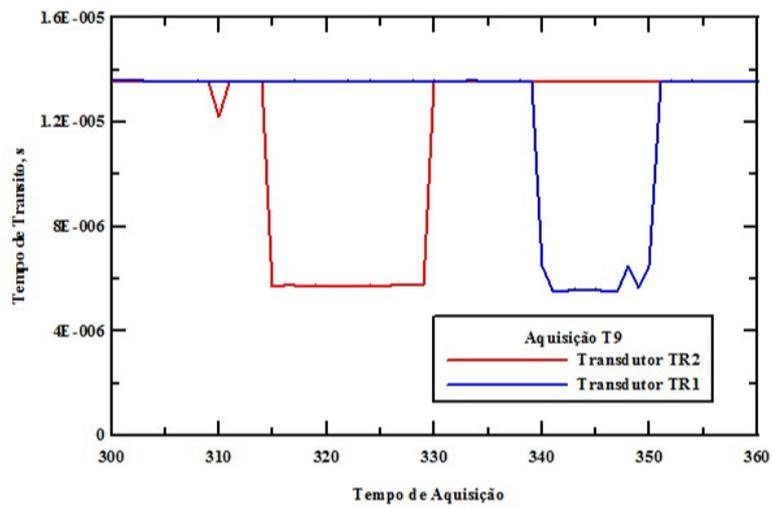
Figura 4.93: Bolha 5 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.16: Parâmetros da Bolha 5

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
5	259	273	282	290	1	14	2



(a)

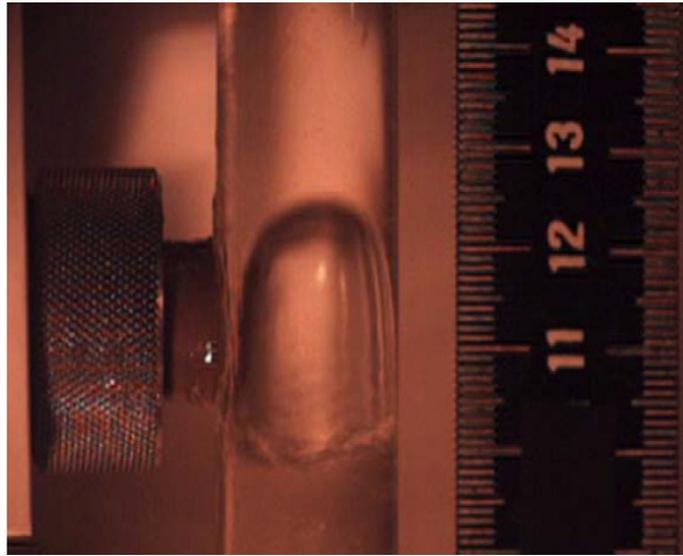


(b)

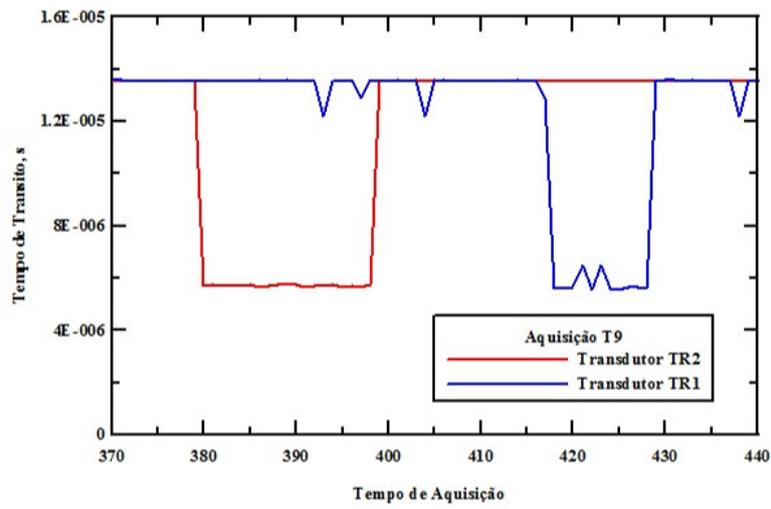
Figura 4.94: Bolha 6 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.17: Parâmetros da Bolha 6

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
6	314	328	339	349	1	14	2



(a)

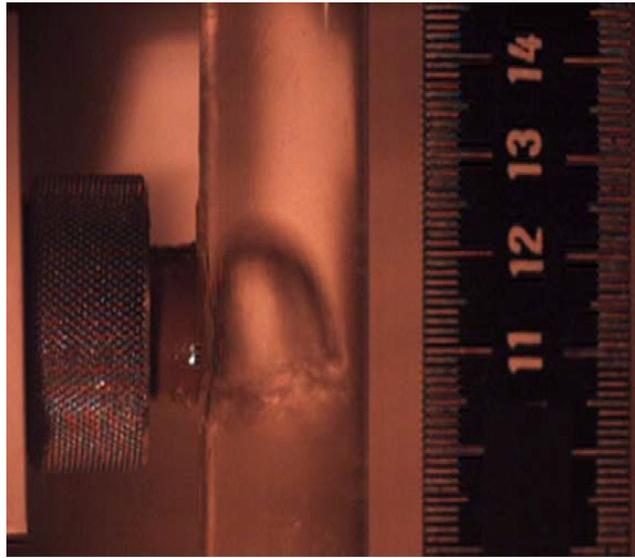


(b)

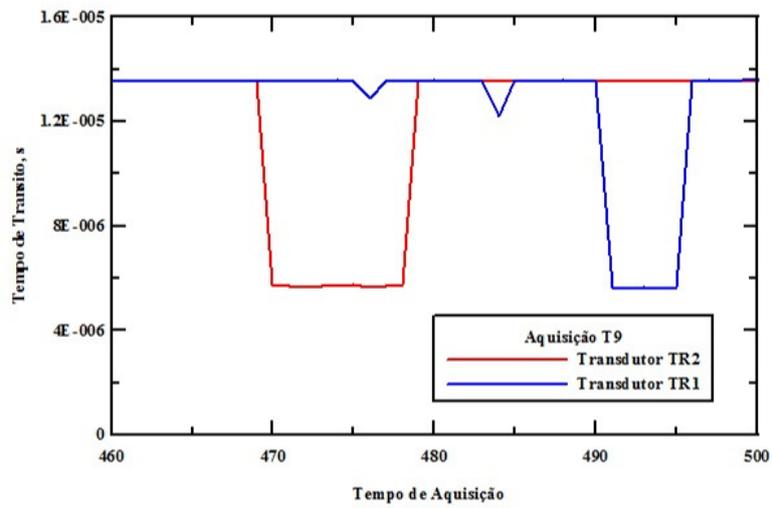
Figura 4.95: Bolha 7 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.18: Parâmetros da Bolha 7

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
7	379	397	417	427	1	18	2



(a)

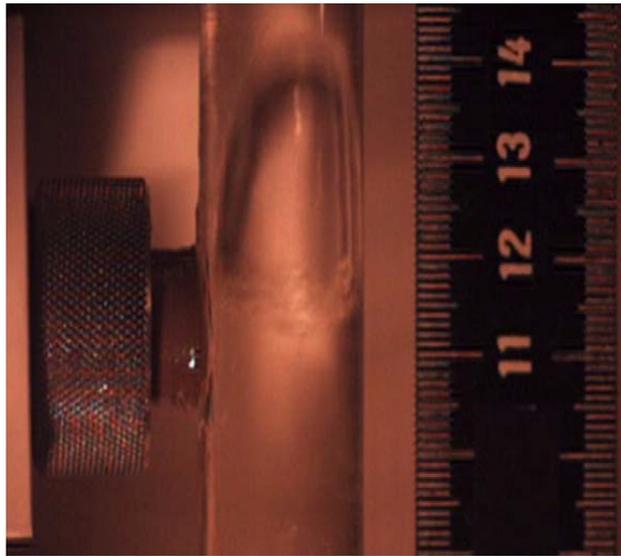


(b)

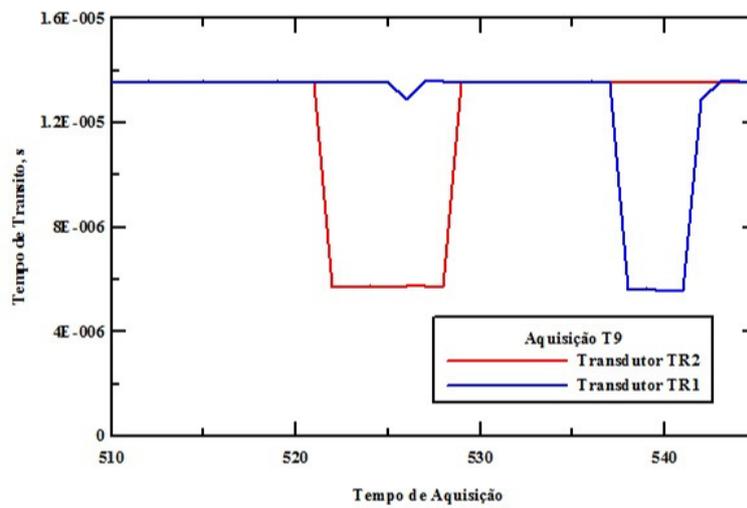
Figura 4.96: Bolha 8 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.19: Parâmetros da Bolha 8

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
8	469	477	490	494	1	8	2



(a)

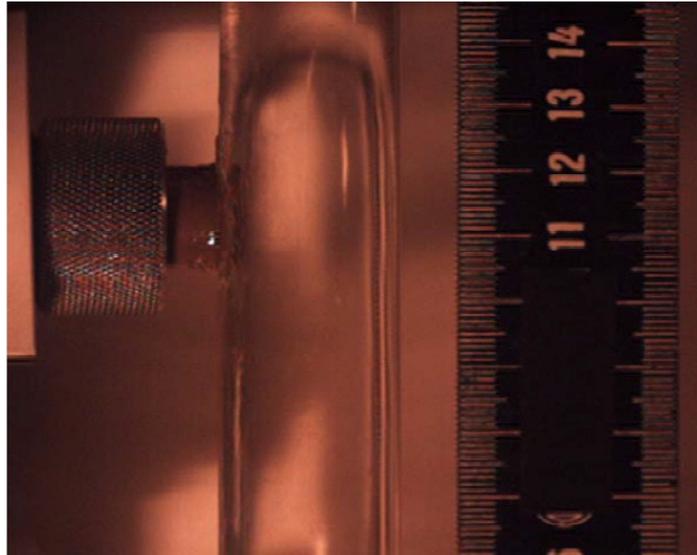


(b)

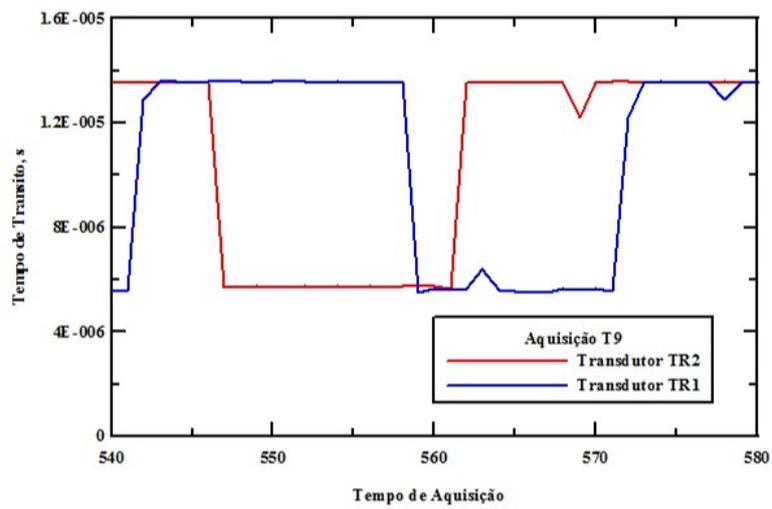
Figura 4.97: Bolha 9 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.20: Parâmetros da Bolha 9

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
9	521	527	537	540	1	6	2



(a)

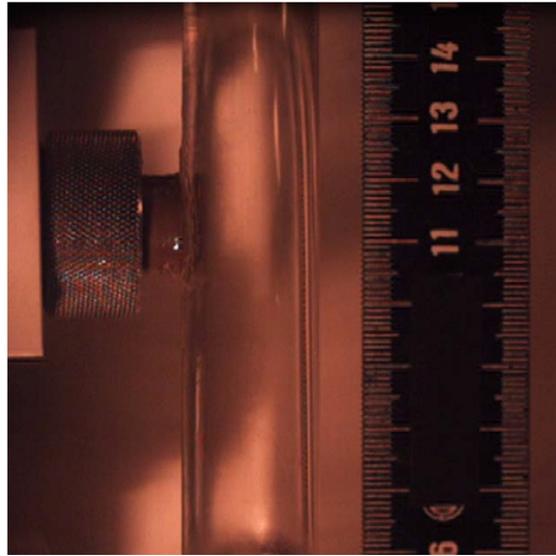


(b)

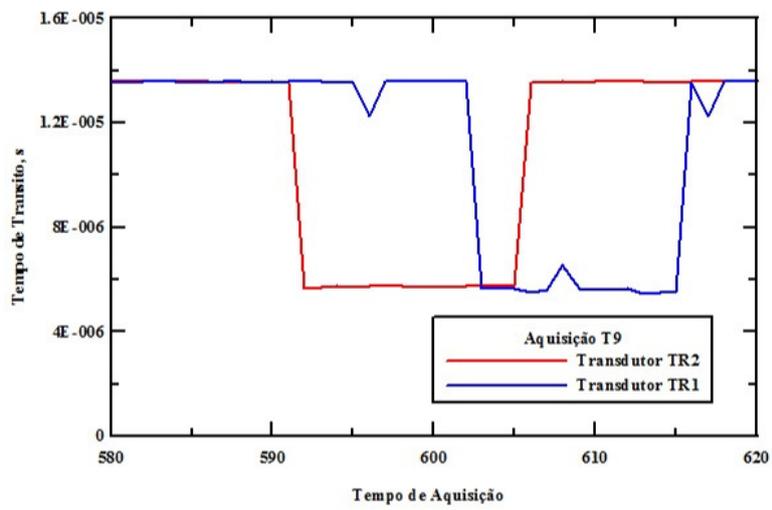
Figura 4.98: Bolha 10 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.21: Parâmetros da Bolha 10

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
10	546	560	558	570	1	14	2



(a)

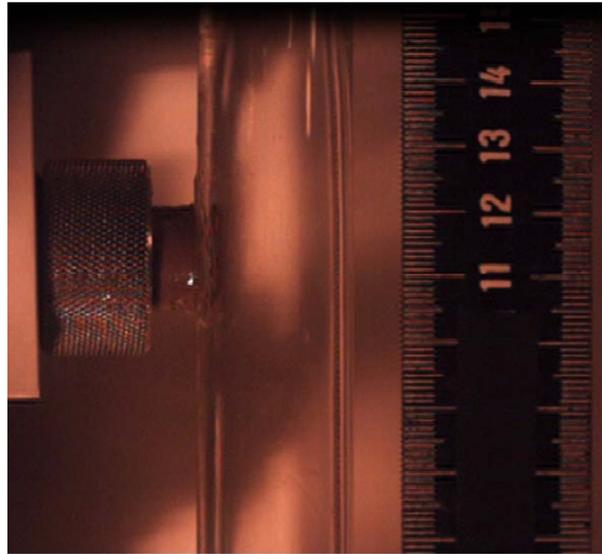


(b)

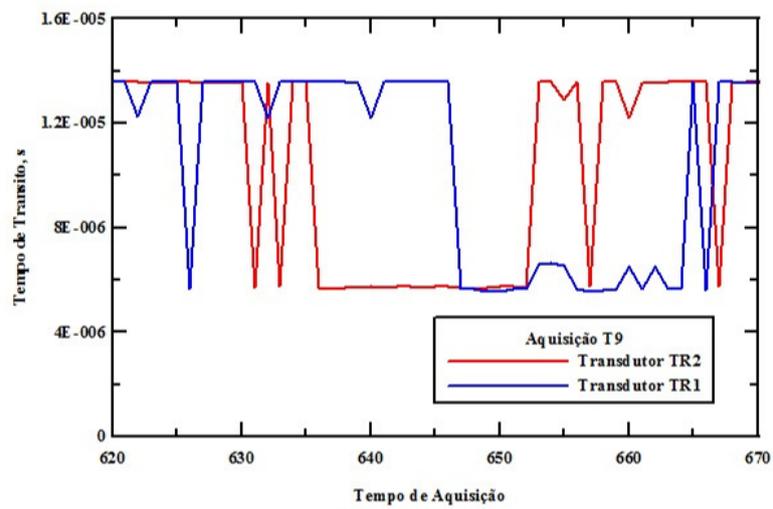
Figura 4.99: Bolha 11 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.22: Parâmetros da Bolha 11

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
11	591	604	602	614	1	13	2



(a)

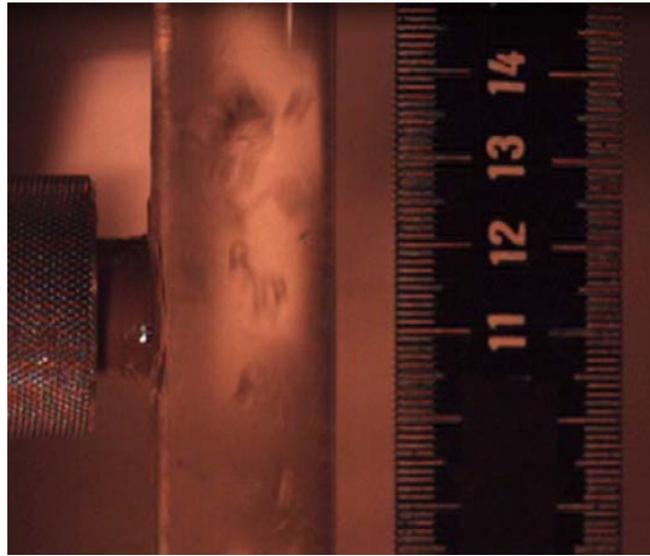


(b)

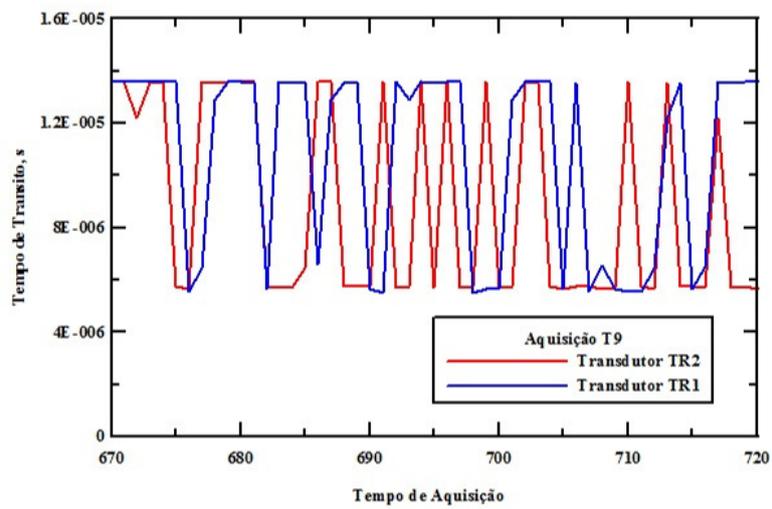
Figura 4.100: Bolha 12 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.23: Parâmetros da Bolha 12

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
12	635	651	646	652	1	16	2



(a)

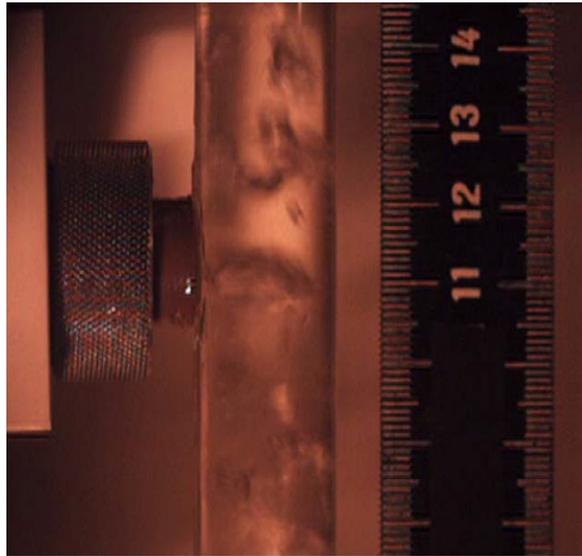


(b)

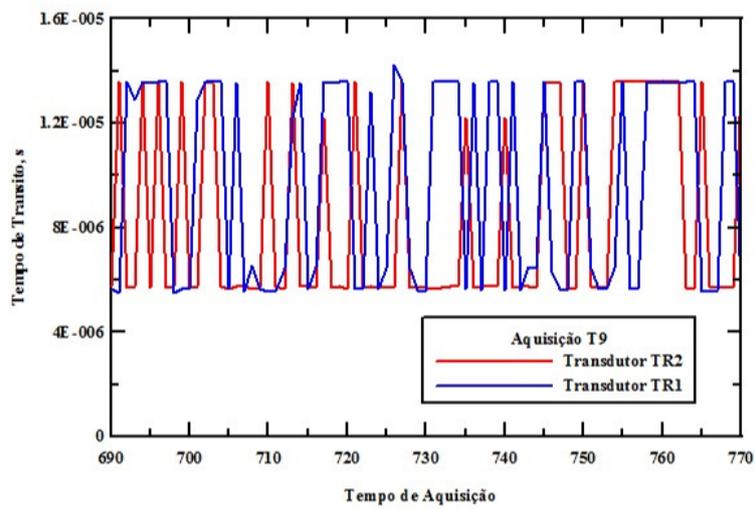
Figura 4.101: Bolha 13 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.24: Parâmetros da Bolha 13

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
13	681	684	706	711	1	3	2



(a)

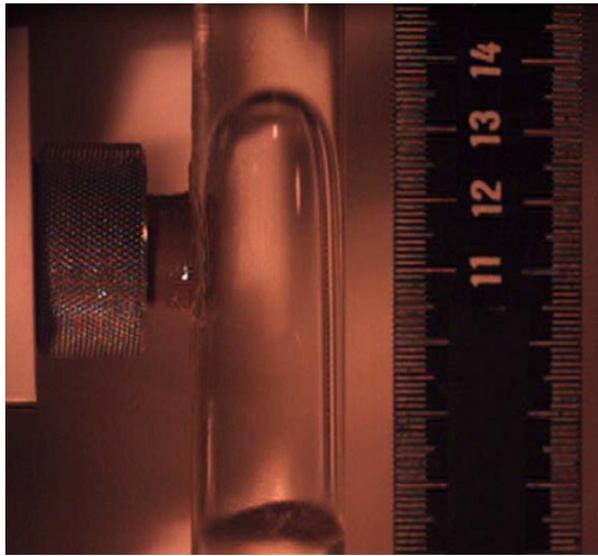


(b)

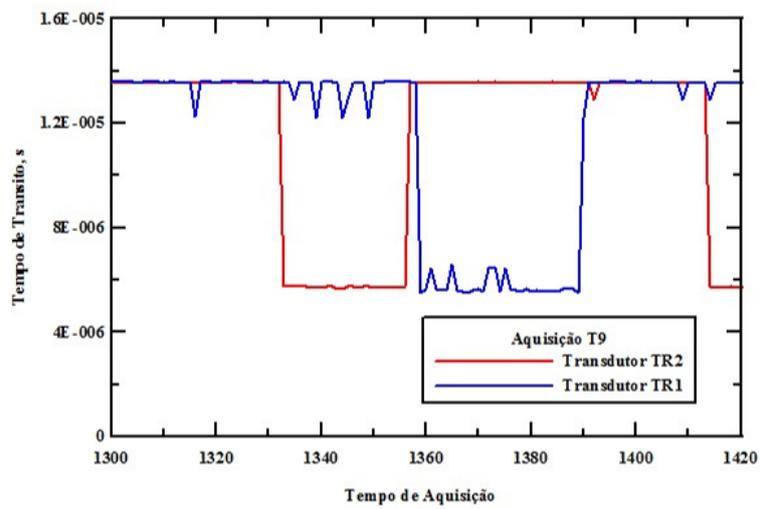
Figura 4.102: Bolha 14 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.25: Parâmetros da Bolha 14

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
14	703	708	750	753	1	5	2



(a)

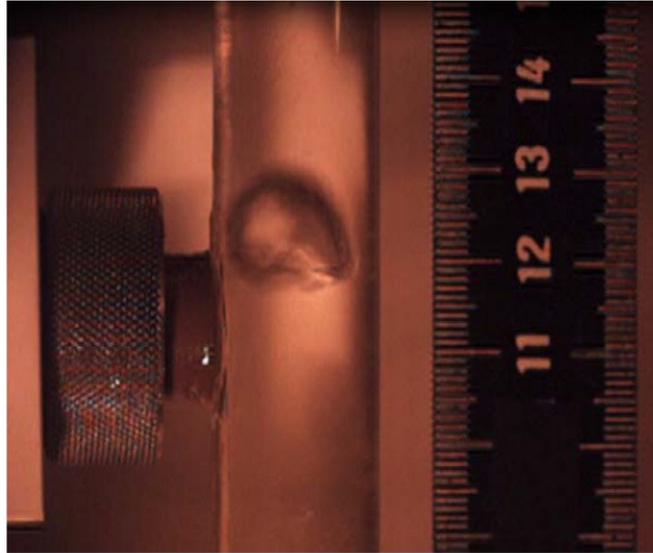


(b)

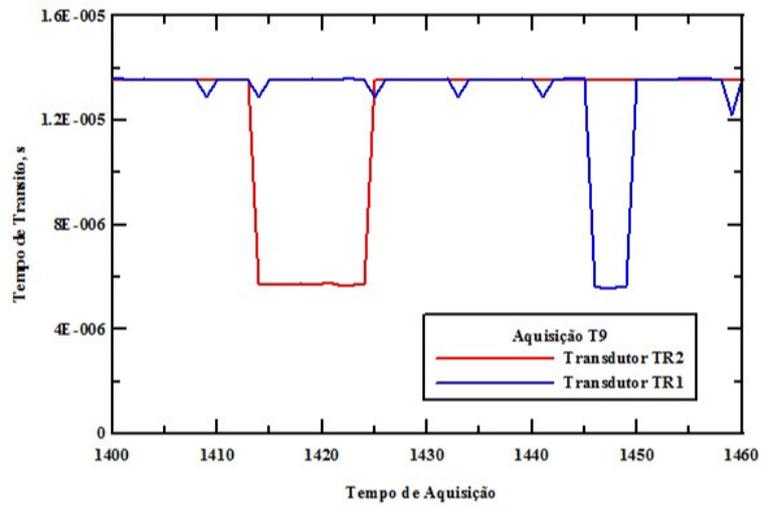
Figura 4.103: Bolha 15 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.26: Parâmetros da Bolha 15

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
15	1332	1355	1358	1371	1	23	1



(a)

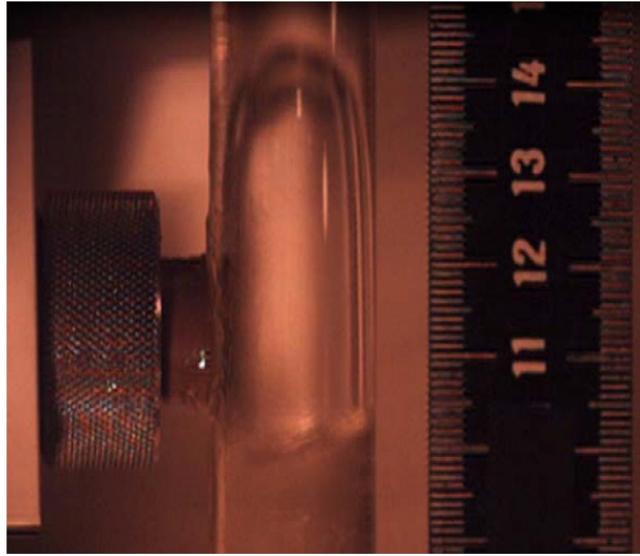


(b)

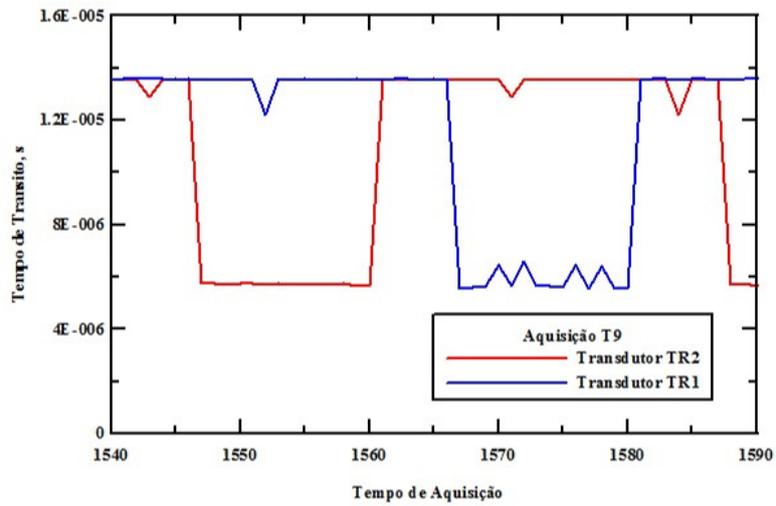
Figura 4.104: Bolha 16 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.27: Parâmetros da Bolha 16

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
16	1413	1423	1445	1448	1	10	2



(a)

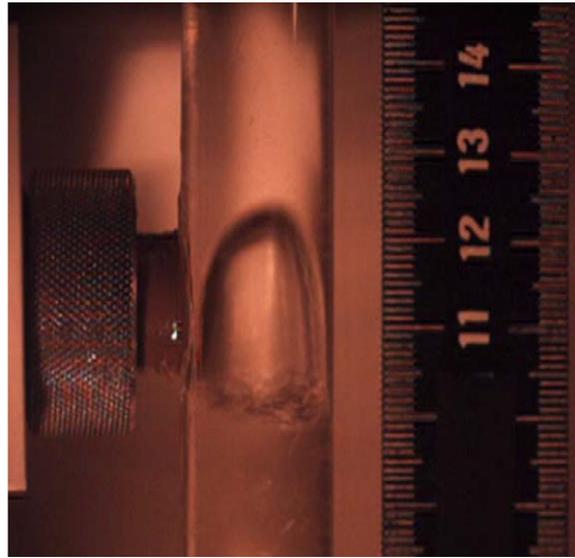


(b)

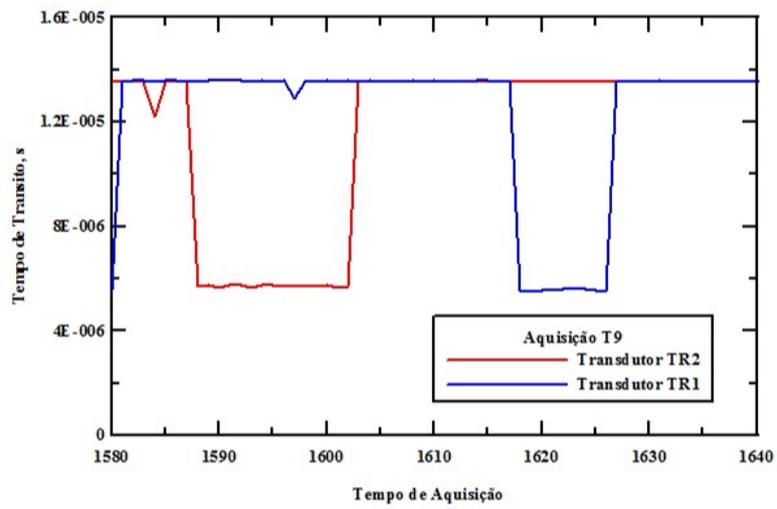
Figura 4.105: Bolha 17 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.28: Parâmetros da Bolha 17

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
17	1546	1559	1566	1579	1	13	2



(a)

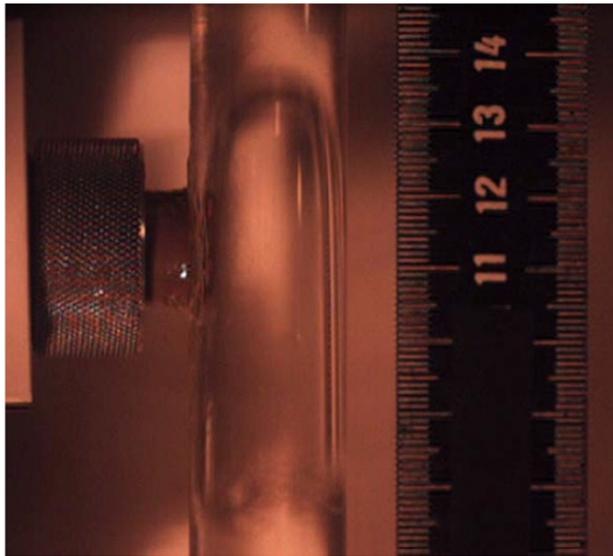


(b)

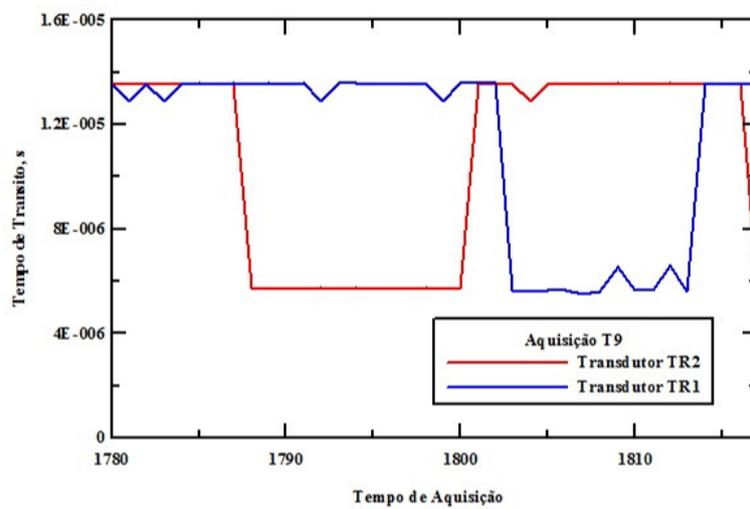
Figura 4.106: Bolha 18 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.29: Parâmetros da Bolha 18

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
18	1587	1601	1617	1625	1	14	2



(a)

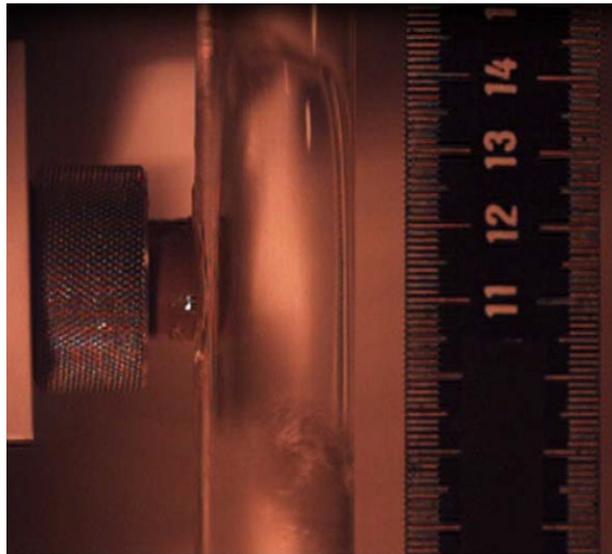


(b)

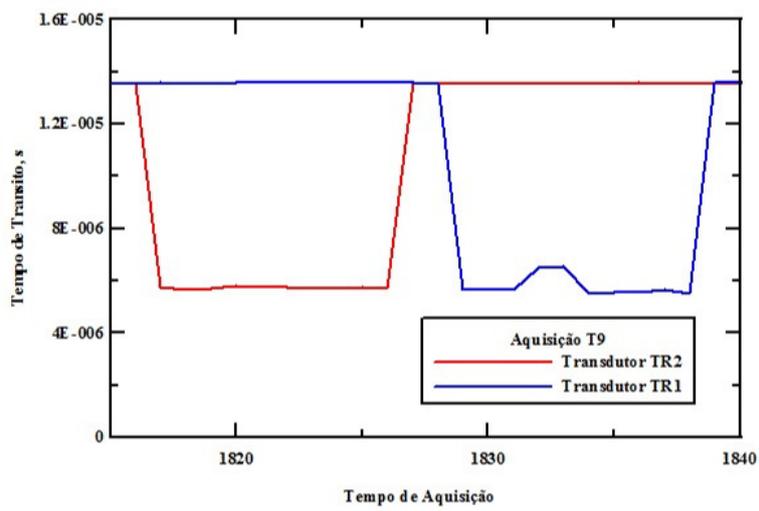
Figura 4.107: Bolha 19 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.30: Parâmetros da Bolha 19

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
19	1787	1799	1802	1812	1	12	2



(a)

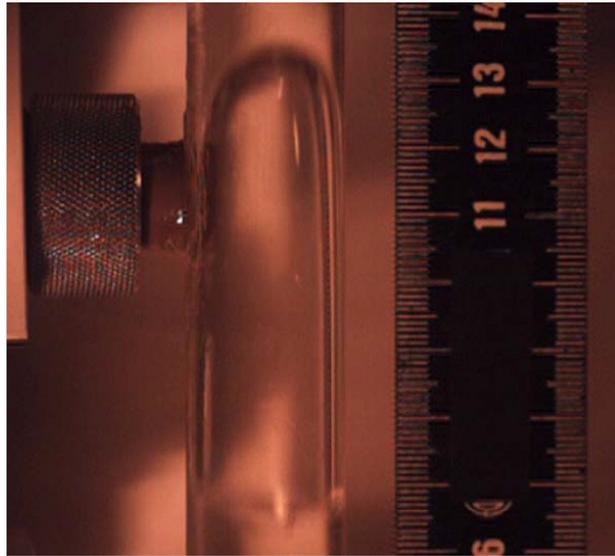


(b)

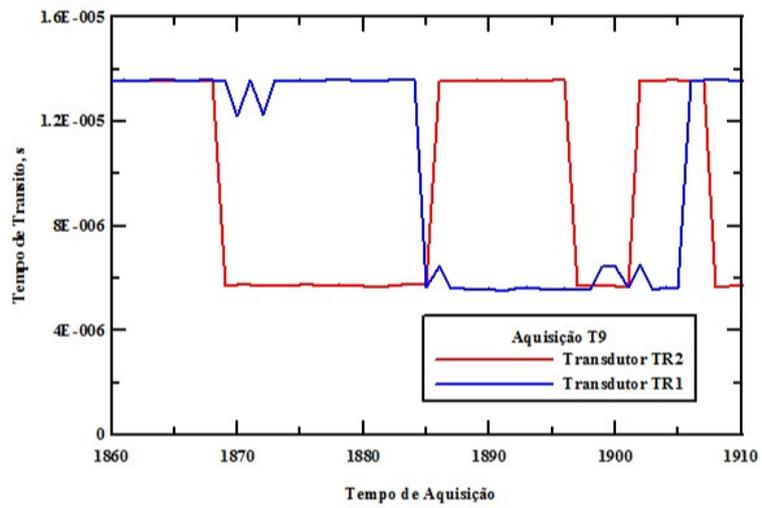
Figura 4.108: Bolha 20 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.31: Parâmetros da Bolha 20

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
20	1816	1825	1828	1831	1	9	2



(a)

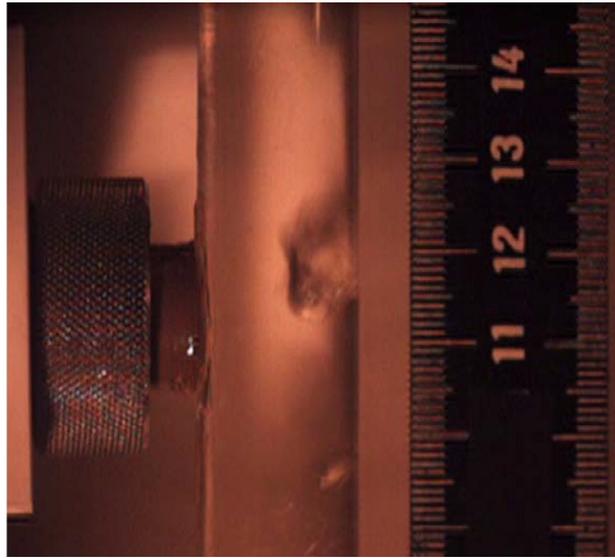


(b)

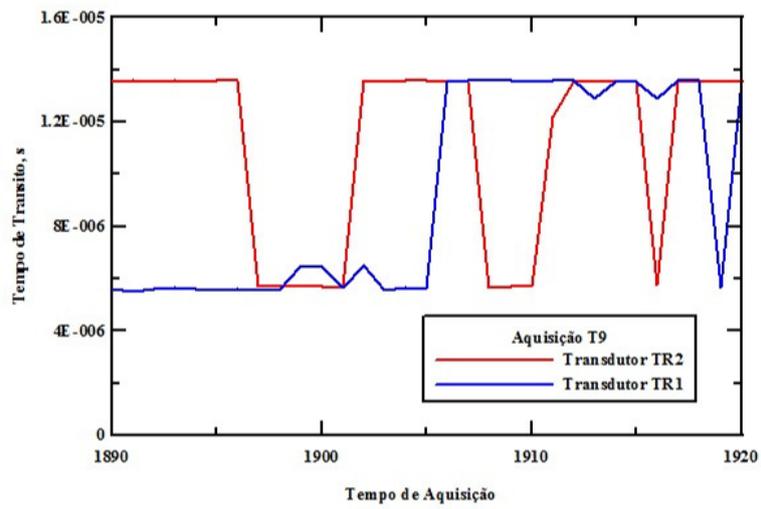
Figura 4.109: Bolha 21 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.32: Parâmetros da Bolha 21

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
21	1868	1884	1884	1898	1	16	2



(a)

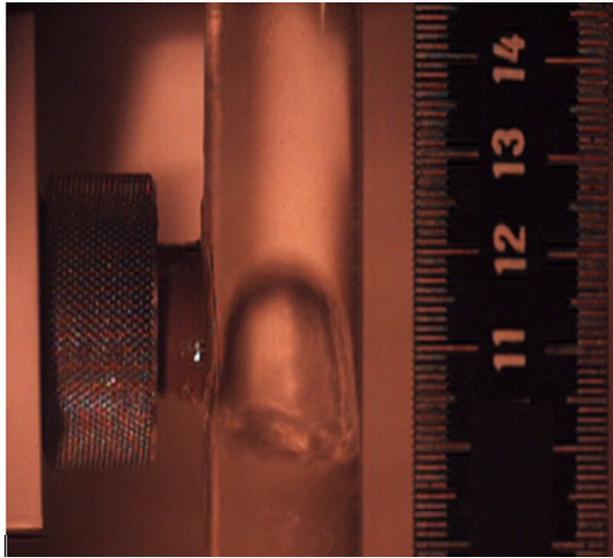


(b)

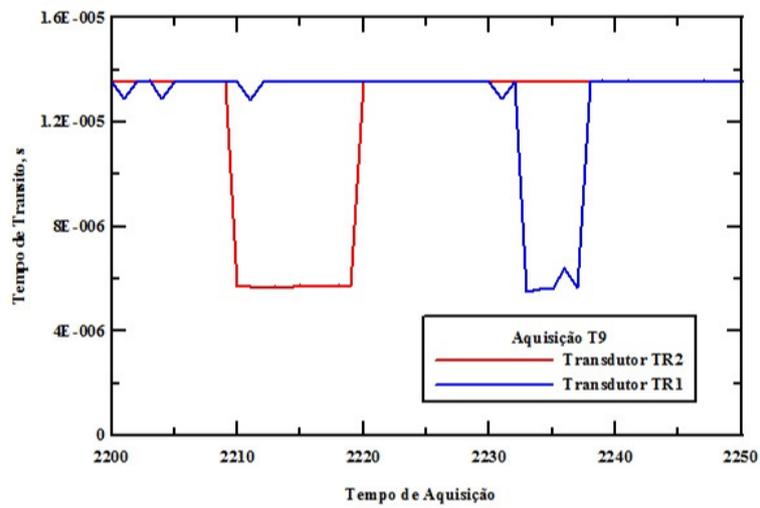
Figura 4.110: Bolha 22 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.33: Parâmetros da Bolha 22

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
22	1896	1900	1899	1904	1	4	2



(a)

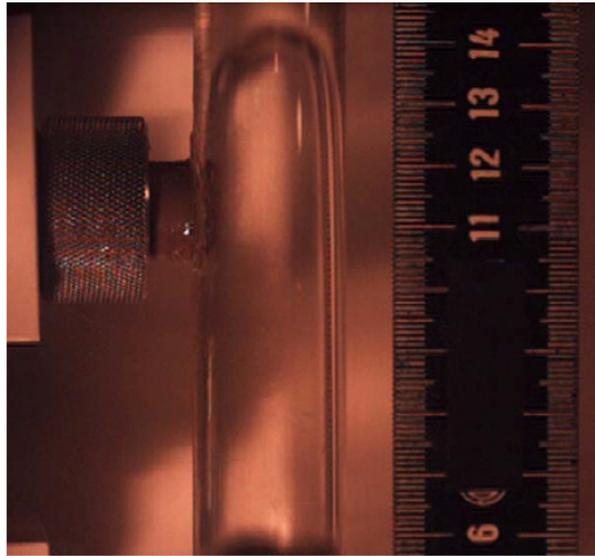


(b)

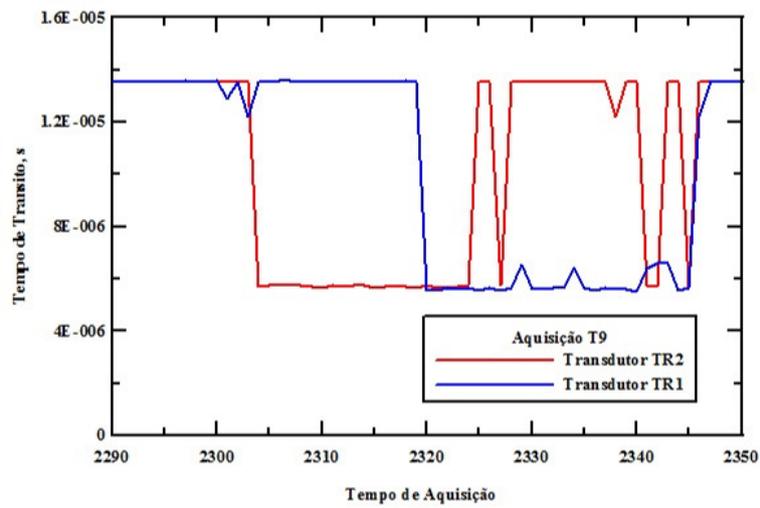
Figura 4.111: Bolha 23 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.34: Parâmetros da Bolha 23

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
23	2209	2218	2232	2236	1	9	2



(a)

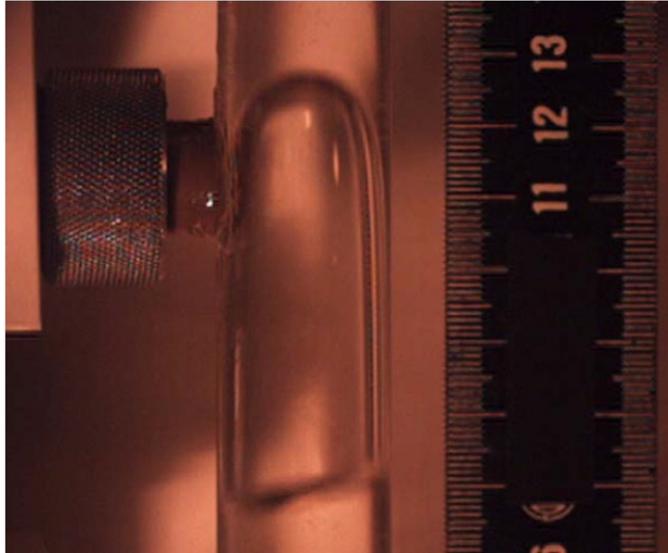


(b)

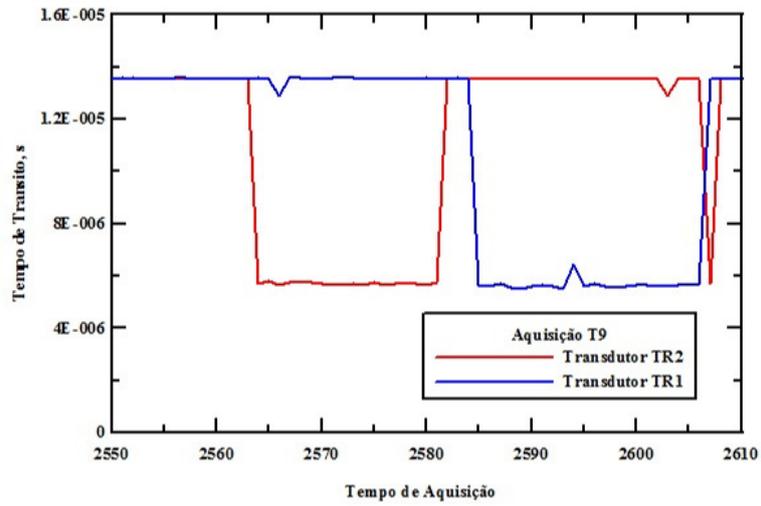
Figura 4.112: Bolha 24 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.35: Parâmetros da Bolha 24

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
24	2303	2323	2319	2340	1	20	2



(a)

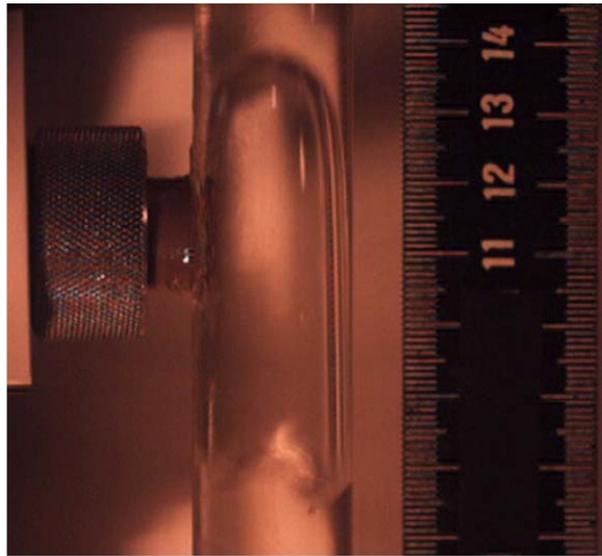


(b)

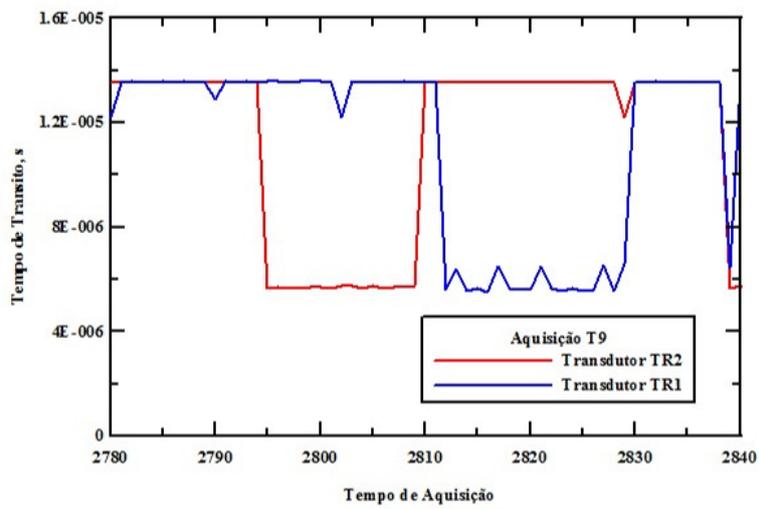
Figura 4.113: Bolha 25 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.36: Parâmetros da Bolha 25

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
25	2563	2580	2584	2605	1	17	2



(a)

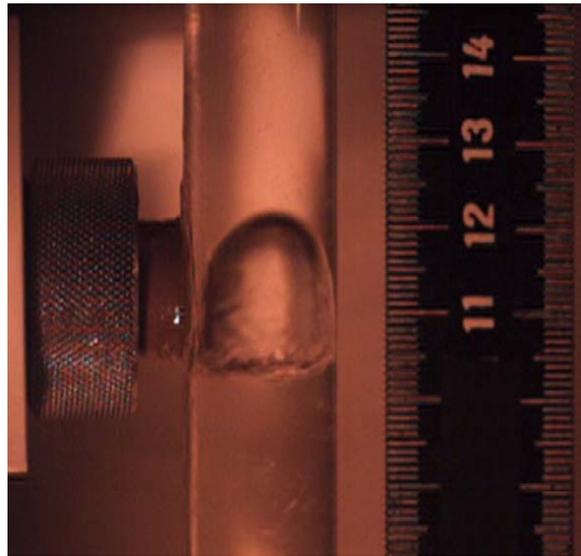


(b)

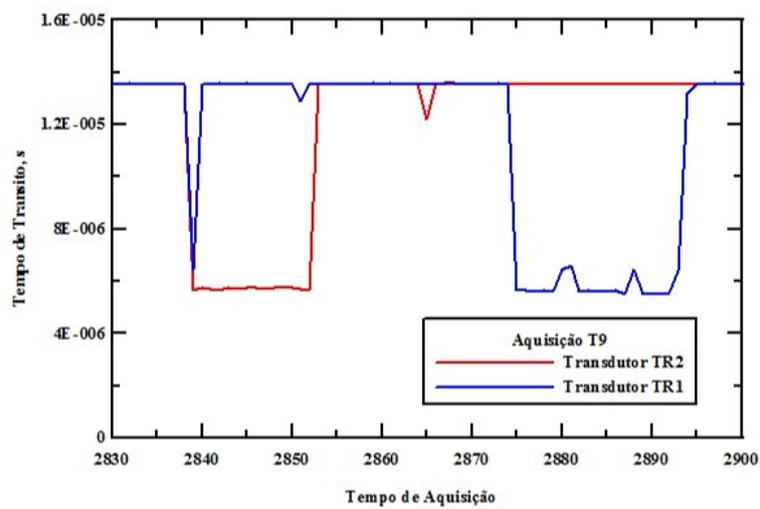
Figura 4.114: Bolha 26 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.37: Parâmetros da Bolha 26

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
26	2794	2808	2811	2828	1	14	2



(a)

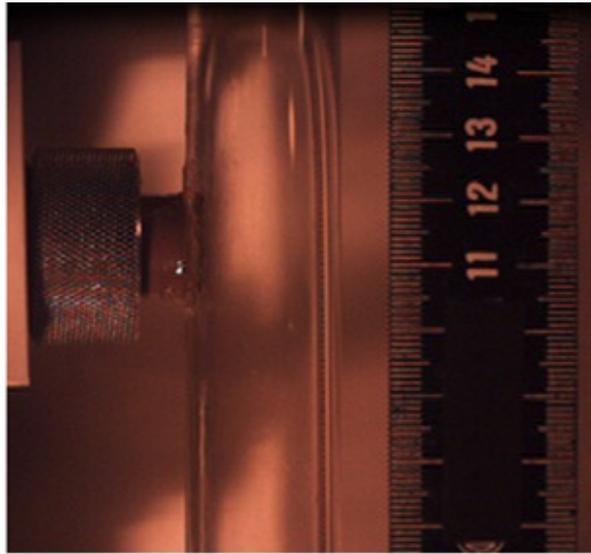


(b)

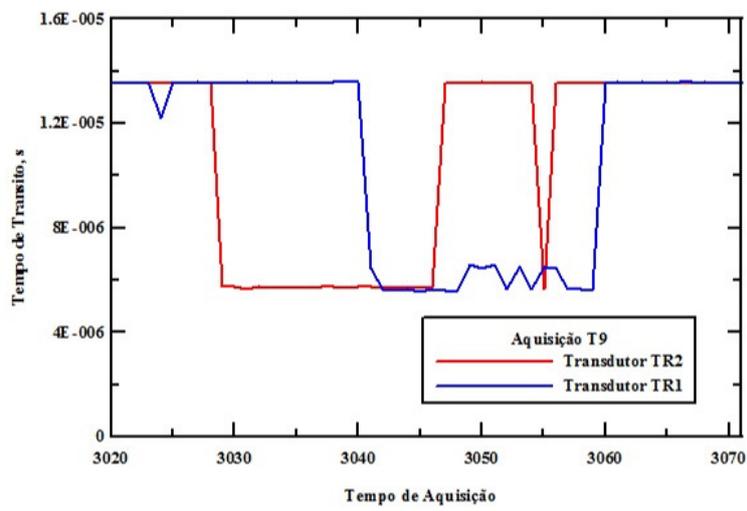
Figura 4.115: Bolha 27 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.38: Parâmetros da Bolha 27

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
27	2838	2851	2874	2879	1	13	2



(a)



(b)

Figura 4.116: Bolha 28 (a) Imagem de Câmera (b) Perfil de Ultrassom

Tabela 4.39: Parâmetros da Bolha 28

Bolha	Aq_{n1}	Aq_{c1}	Aq_{n2}	Aq_{c2}	Naq_{Nariz}	Naq_{Corpo}	Naq_{Cauda}
28	3028	3045	3040	3048	1	17	2

As aquisições de sinais ultrassônicos foram obtidas por aplicativo do sistema supervisorio integrado ao sistema de gerenciamento de placa de aquisição de sinais ultrassônicos. Este aplicativo gera uma planilha eletrônica, contendo as informações emitidas pelos dois transdutores ultrassônicos. As informações referem-se aos tempos de trânsito das ondas ultrassônicas em função das aquisições. Estas aquisições foram obtidas pela passagem de nariz e cauda das bolhas pelos respectivos transdutores.

O cálculo de velocidade de bolha é obtido tomando-se a diferença entre a aquisição da passagem do nariz da bolha pelo primeiro transdutor e a aquisição da passagem do nariz da bolha pelo segundo transdutor. A distância percorrida, neste intervalo de tempo, corresponde ao espaçamento de 0,070 m entre os transdutores 1 e 2. A relação entre a distância e o tempo equivalente às aquisições corresponde ao valor da velocidade da bolha.

O cálculo do comprimento de bolha é executado, obtendo-se a diferença entre a aquisição da passagem do nariz da bolha pelo primeiro transdutor e a aquisição da passagem da cauda pelo mesmo transdutor. A distância é calculada, utilizando-se o intervalo de tempo equivalente às aquisições versus a velocidade calculada da bolha, corresponde ao comprimento da bolha. Este comprimento após ser calculado, possibilita passar-se para um próximo passo, que é o de calcular os comprimentos do nariz, do corpo e da cauda da bolha. Para isso, usa-se as informações geradas por outro sistema supervisorio do aplicativo de processamento de sinais ultrassônicos. Este aplicativo traça o perfil da bolha e define o seu comprimento em termos das quantidades de aquisições. Para este cálculo deve-se transformar as aquisições para tempos reais em segundos.

Com os tempos e as velocidades de bolhas calculados, obtém-se os comprimentos correspondentes ao nariz, ao corpo e à cauda. Pode-se com o perfil da calcular o tempo de trânsito médio do nariz à cauda, pela relação entre a soma dos tempos de trânsito pela quantidade de aquisições, considerando-se o intervalo do nariz à cauda.

O próximo passo trata-se de calcular o diâmetro da bolha. Mas, para se obter o diâmetro da bolha deve-se, primeiramente, dimensionar o filme de líquido. O trajeto do sinal ultrassônico passa pela sapata, pelo acoplante, pelo tubo de vidro e

pelo filme de líquido até atingir a interface líquido-vapor. A sapata mede 0,013 m e a espessura do vidro é de 0,002 m. O acoplante é desprezado. Com os valores das velocidades do som na sapata e no vidro, corrigidas para $90^{\circ}C$, calcula-se o tempo gasto para o som atravessar estes meios. Com este valor calculado e o tempo de trânsito médio, obtém-se o tempo de trânsito na água. Utilizando-se este tempo de trânsito multiplicado pela velocidade do som corrigida na água, obtém-se o filme de líquido.

O diâmetro da bolha é obtido efetuando-se a diferença entre o diâmetro interno do tubo de vidro e o dobro do filme de líquido calculado. Este diâmetro é utilizado para cálculo dos volumes do nariz, do corpo e da cauda da bolha. Para cálculo do volume do nariz da bolha utiliza-se a equação do volume da calota esférica, com os valores do comprimento calculado do nariz e do raio da bolha.

No cálculo do filme de líquido da bolha no.22 foi verificado que o mesmo tem valor superior ao diâmetro da bolha, por este motivo o procedimento de cálculo é executado, efetuando-se a diferença entre diâmetro interno do tubo e o filme de líquido.

O volume do corpo da bolha é calculado pela equação do volume do cilindro com o raio da bolha e o comprimento do corpo da bolha. Para o cálculo do volume da cauda utiliza-se a equação do volume do cilindro com o comprimento da cauda e raio da bolha. Considera-se o volume final da cauda como a metade do volume do cilindro.

O volume da bolha é então obtido pela soma dos volumes do nariz, do corpo e da cauda. A fração de vazio da bolha é calculada pela relação entre o volume da bolha e o volume total na região da bolha. O volume total foi considerado como o volume do cilindro de comprimento equivalente do nariz à cauda da bolha.

A fração de vazio média é dimensionada utilizando-se a fração de vazio da bolha multiplicada pela relação entre o comprimento da bolha e comprimento entre o nariz da bolha e o nariz da bolha que a sucede. O pistão de líquido é a camada de líquido entre a cauda da bolha e o nariz da bolha que a sucede.

Um resumo dos valores calculados para todas as bolhas encontra-se na Tabela 4.40, além das médias destes valores.

Tabela 4.40: Parâmetros das Bolhas

Bolha	L_B (m)	V_B (m/s)	L_s (m)	α_B	α_{med}	h_L (m)	D_B (m)
1	0,023	0,176	0,193	0,29	0,03	0,004	0,012
2	0,044	0,154	0,116	0,43	0,12	0,003	0,014
3	0,039	0,185	0,152	0,39	0,08	0,003	0,013
4	0,044	0,154	0,119	0,43	0,12	0,003	0,014
5	0,046	0,161	0,115	0,43	0,12	0,003	0,014
6	0,042	0,148	0,094	0,43	0,13	0,003	0,014
7	0,035	0,098	0,241	0,47	0,06	0,002	0,014
8	0,030	0,176	0,193	0,35	0,05	0,004	0,013
9	0,031	0,232	0,111	0,30	0,07	0,004	0,012
10	0,088	0,309	0,198	0,55	0,17	0,002	0,016
11	0,089	0,337	0,198	0,55	0,17	0,002	0,016
12	0,108	0,337	0,084	0,73	0,41	0,001	0,018
13	0,011	0,148	0,028	0,28	0,08	0,004	0,012
14	0,009	0,079	1,6843	0,62	0,003	0,001	0,018
15	0,065	0,143	0,127	0,51	0,17	0,002	0,015
16	0,024	0,116	0,431	0,38	0,02	0,003	0,013
17	0,049	0,185	0,065	0,43	0,18	0,003	0,014
18	0,035	0,124	0,870	0,43	0,02	0,003	0,014
19	0,061	0,247	0,099	0,42	0,16	0,003	0,014
20	0,058	0,309	0,100	0,37	0,14	0,004	0,013
21	0,074	0,123	0,028	0,46	0,34	0,003	0,014
22	0,012	0,124	0,943	0,09	0,001	0,013	0,007
23	0,030	0,161	0,373	0,37	0,03	0,003	0,013
24	0,092	0,232	0,802	0,65	0,07	0,002	0,017
25	0,060	0,176	0,883	0,46	0,03	0,003	0,014
26	0,062	0,218	0,059	0,44	0,23	0,003	0,014
27	0,027	0,103	1,035	0,47	0,01	0,0043	0,015
28	0,105	0,309	0,731	0,70	0,09	0,001	0,017
<i>Médias</i>	0,050	0,188	0,360	0,44	0,11	0,003	0,14

4.2.15 Aquisições, Processamentos de Imagens e Equações de Perfis de Bolhas

Este estudo visa a identificar a equação para cálculo do diâmetro da bolha, em função do perfil da bolha variando no eixo z , em escoamento vertical ascendente. As aquisições de imagens obtidas de filmagem com a realização de experimento com $P = 1,1$ kW e $Q_s = 3$ L/h.

As imagens geradas por câmera de alta velocidade foram visualizadas por software, para marcação de pontos ao longo da interface líquido-vapor. A marcação dos pontos gera um percurso em função da posição de pixel transformada em cota métrica.

A imagem modificada foi processada por software Matlab, para obtenção da equação característica do perfil da bolha. A densidade e viscosidade da região da bolha é responsável pela deformação do corpo da bolha, inclinação do nariz e velocidade do filme de líquido.

A equação característica permite mapear ao diâmetro da bolha ao longo do movimento ascendente do nariz à cauda, a partir da posição do ponto da curva do perfil, ao longo do eixo Z .

Observando-se os valores de múltiplos de diâmetros de bolhas, nota-se que ocorre a partir das bolhas 1 e 2, o aumento do comprimento da bolha seguinte 3, provocado por escoamento de transição pistonado-agitado e, posterior decréscimo nas bolhas seguintes 4 e 5 e com a tendência do término do ciclo de intermitência, o comprimento das bolhas seguintes 6 e 7, continua decrescendo até o fim do ciclo.

Pela análise dos coeficientes em relação à relativo à a , o ciclo apresenta a sequência com a Bolha até $1D$, que corresponde à Bolha 7 (B7, $a = 0,161$). A sequência continua com as Bolhas 5 e 6 entre $1D-2D$, que corresponde (B5; $a = 0,0164$) e (B6; $a = 0,0023$). Na sequência tem-se as Bolhas 1 e 2 entre $2D-3D$, que corresponde (B1; $a = 0,0024$) (B2; $a = 0,0161$). Outra sequência tem as Bolhas 3 e 4 entre $3D-4D$, que corresponde (B3; $a = 0,0031$) (B4; $a = 0,0131$). Dentro dos intervalos as bolhas maiores apresentam maiores coeficientes em a .

Na Tabela 4.45, tem-se os coeficientes das retas das equações de diâmetros de

bolhas em função do perfil da bolha.

Tabela 4.41: Equação da Curva de Perfil de Bolha

Bolha	Termo a	Termo b (Y)	Termo c (Y ²)	L_B	V_B	$\times D$
1	0,0024	15,5415	1103,1261	0,044	0,907	2 – 3
2	0,0161	10,6282	733,8663	0,045	0,657	2 – 3
3	0,0031	16,3768	1138,2575	0,063	0,593	3 – 4
4	0,0131	7,7603	366,9699	0,071	0,579	3 – 4
5	0,0164	5,4415	383,4871	0,032	0,572	1 – 2
6	0,0023	2,4205	118,1386	0,021	0,497	1 – 2
7	0,0161	6,5066	446,5289	0,019	0,344	0 – 1

Bolhas com Comprimento Equivalente até 1D

Os comprimentos de bolhas foram estimados através de processamento de imagem.

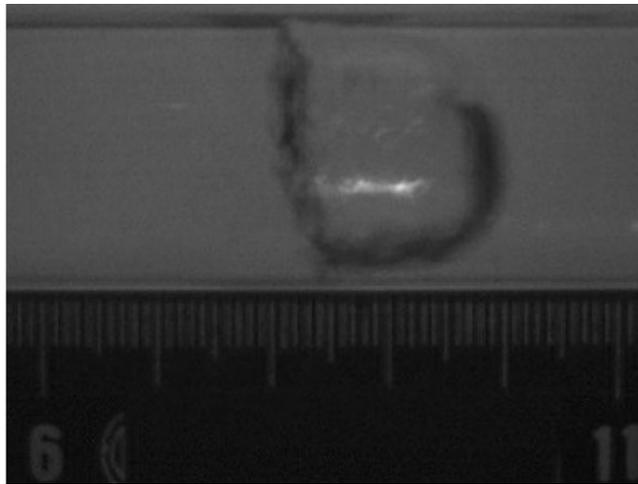


Figura 4.117: Imagem com Escala de Perfil da Bolha 7

$$D_{B7} = 0,0161 + 6,5066Y_{B7} - 446,5289Y_{B7}^2 \quad (4.1)$$

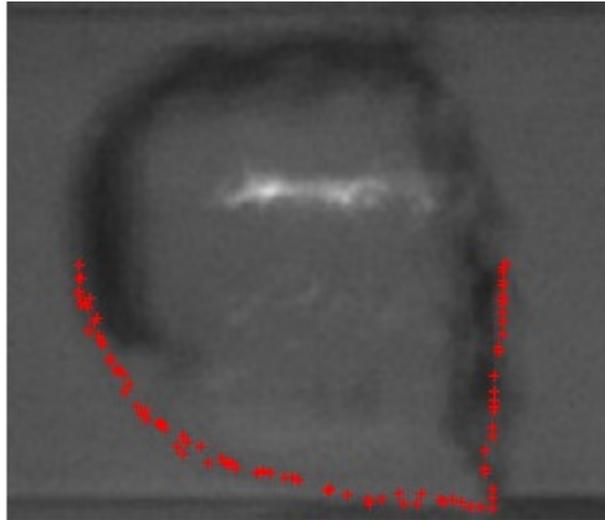


Figura 4.118: Processamento de Imagem de Perfil da Bolha 7

Tabela 4.42: Equação da Curva de Perfil de Bolha

Bolha	Termo a	Termo b (Y)	Termo c (Y^2)	L_B	V_B	$\times D$
7	0,0161	6,5066	446,5289	0,019	0,344	0 – 1

Bolhas com Comprimento Equivalente de 1D a 2D

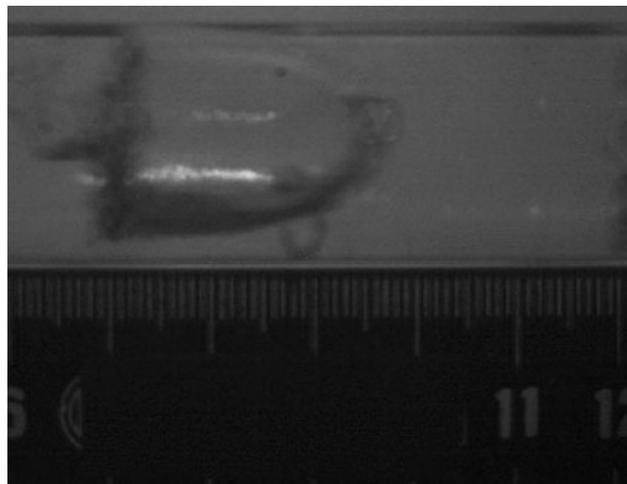


Figura 4.119: Imagem com Escala de Perfil da Bolha 5

$$D_{B5} = 0,0164 + 5,4415Y_{B5} - 383,4871Y_{B5}^2 \quad (4.2)$$

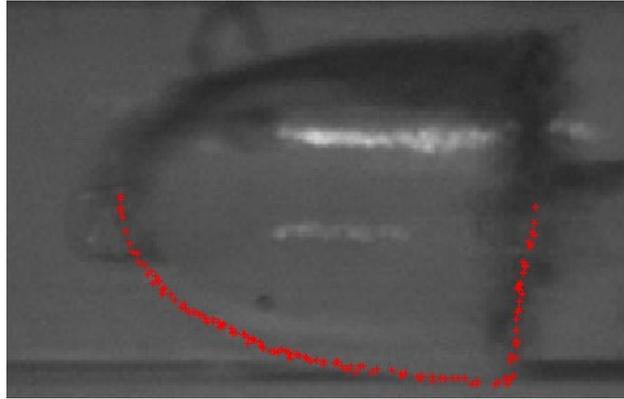


Figura 4.120: Processamento de Imagem de Perfil da Bolha 5

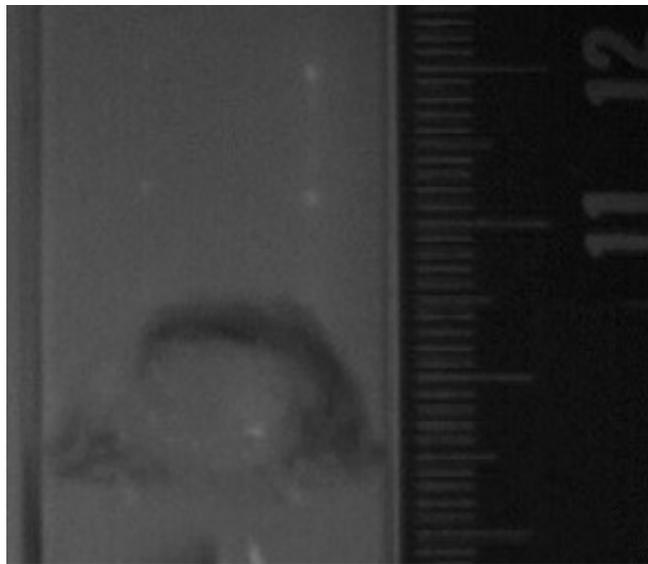


Figura 4.121: Imagem com Escala de Perfil da Bolha 6

$$D_{B6} = 0,0023 + 2,4205Y_{B6} - 118,1386Y^2_{B6} \quad (4.3)$$

Tabela 4.43: Equação da Curva de Perfil de Bolha

Bolha	Termo a	Termo b (Y)	Termo c (Y^2)	L_B	V_B	$\times D$
5	0,0164	5,4415	383,4871	0,032	0,572	1 – 2
6	0,0023	2,4205	118,1386	0,021	0,497	1 – 2

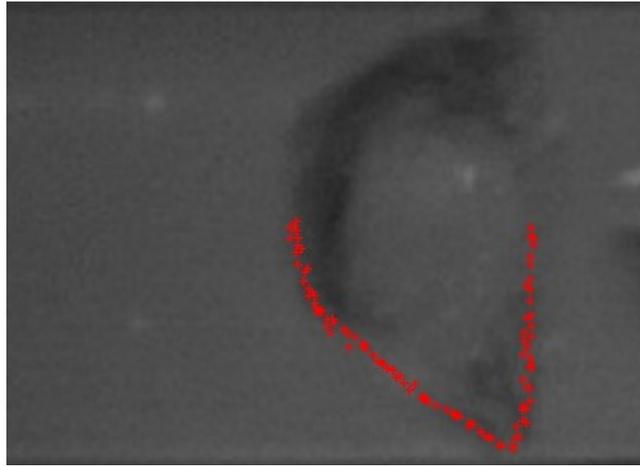


Figura 4.122: Processamento de Imagem de Perfil da Bolha 6

Bolhas com Comprimento Equivalente de 2D a 3D

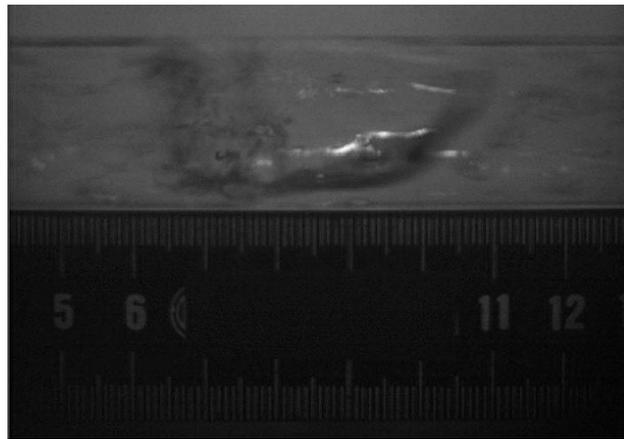


Figura 4.123: Imagem com Escala de Perfil da Bolha 1

$$D_{B1} = 0,0024 + 15,5415Y_{B1} - 1103,1261Y_{B1}^2 \quad (4.4)$$

$$D_{B2} = 0,0161 + 10,6282Y_{B2} - 733,8663Y_{B2}^2 \quad (4.5)$$

Bolhas com Comprimento Equivalente de 3D a 4D

$$D_{B3} = 0,0031 + 16,3768Y_{B3} - 1138,2575Y_{B3}^2 \quad (4.6)$$

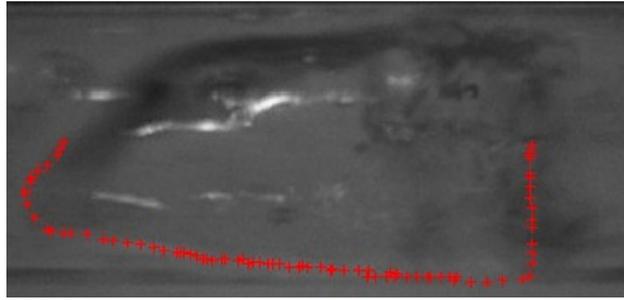


Figura 4.124: Processamento de Imagem de Perfil da Bolha 1

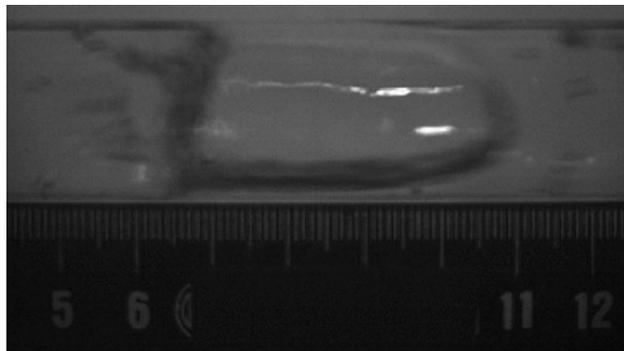


Figura 4.125: Imagem com Escala de Perfil da Bolha 2

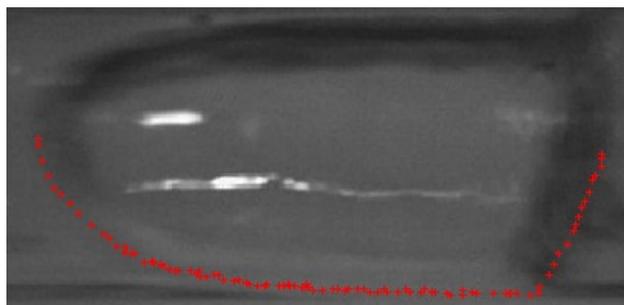


Figura 4.126: Processamento de Imagem de Perfil da Bolha 2

Tabela 4.44: Equação da Curva de Perfil de Bolha

Bolha	Termo a	Termo b (Y)	Termo c (Y ²)	L _B	V _B	×D
1	0,0024	15,5415	1103,1261	0,044	0,907	2 – 3
2	0,0161	10,6282	733,8663	0,045	0,657	2 – 3

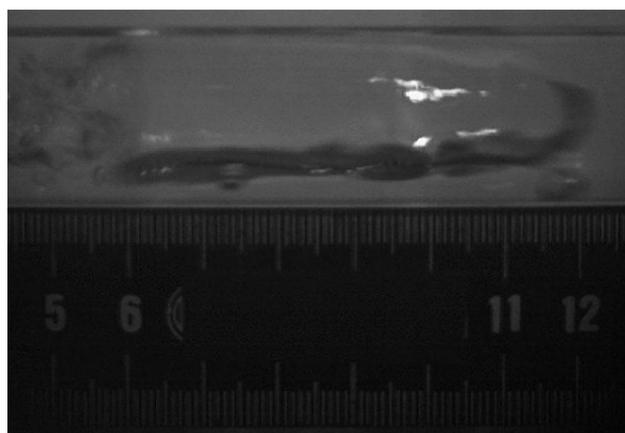


Figura 4.127: Imagem com Escala de Perfil da Bolha 3

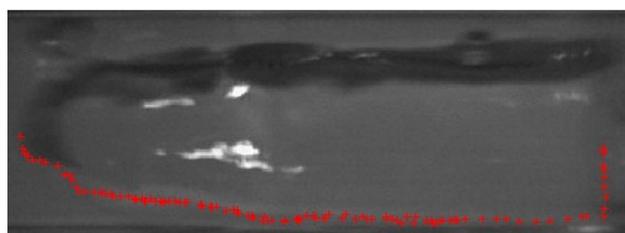


Figura 4.128: Processamento de Imagem de Perfil da Bolha 3

$$D_{B4} = 0,0131 + 7,7603Y_{B4} - 366,9699Y_{B4}^2 \quad (4.7)$$

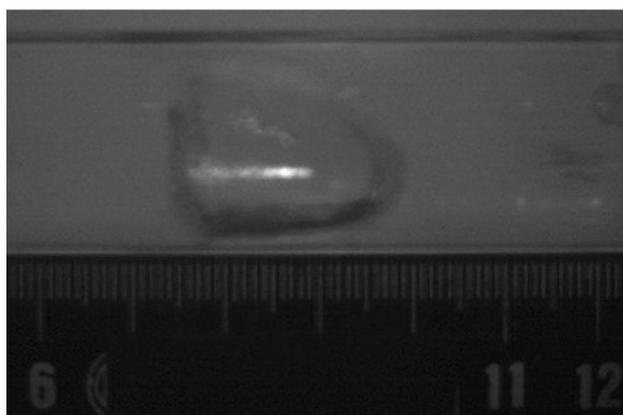


Figura 4.129: Imagem com Escala de Perfil da Bolha 4

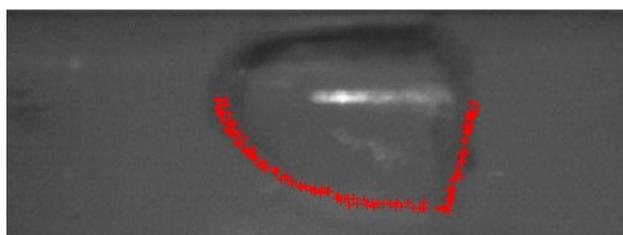


Figura 4.130: Processamento de Imagem de Perfil da Bolha 4

Tabela 4.45: Equação da Curva de Perfil de Bolha

Bolha	Termo a	Termo b (Y)	Termo c (Y^2)	L_B	V_B	$\times D$
3	0,0031	16,3768	1138,2575	0,063	0,593	3 – 4
4	0,0131	7,7603	366,9699	0,071	0,579	3 – 4

4.2.16 Medições de Temperaturas na Perna Quente

As Figuras 4.131 a 4.134 mostram as evoluções de temperaturas na perna quente com potências elétricas, $P = 1,1$ kW, $P = 1,0$ kW, $P = 0,9$ kW e $P = 0,8$ kW, além de quatro vazões de água de resfriamento do trocador de calor de $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h.

As temperaturas observadas para combinações com potências mais altas e vazões de resfriamento secundário mais baixas, apresentaram comportamento com possibilidades da temperatura do fluido escoar na seção secundária do trocador de calor e atingir o seu ponto de saturação, devido a menor troca de calor entre os sistemas primário e secundário.

As combinações de potências menores e altas vazões secundárias, como era esperado, apresentaram comportamento com melhor troca de calor entre o sistemas primário e secundário, além de estabilização da temperatura na fase de escoamento bifásico.

Um fato a acrescentar é a influência na temperatura ambiente na temperatura da água de resfriamento secundário. Pode-se verificar no gráfico que a curva referente à vazão de 12 l/h está acima da vazão de 9 l/h, devido à temperatura da água de resfriamento secundário da maior vazão estar numa temperatura mais alta. A água da vazão de 9 l/h é a mais baixa entre as temperaturas do gráfico.

O experimento com potência de $P = 0,9$ kW apresentou comportamentos muito similares para todas as vazões secundárias, com um resultado em que a diferenciação entre as vazões se mostra em termos de escalas de tempo referente às vazões.

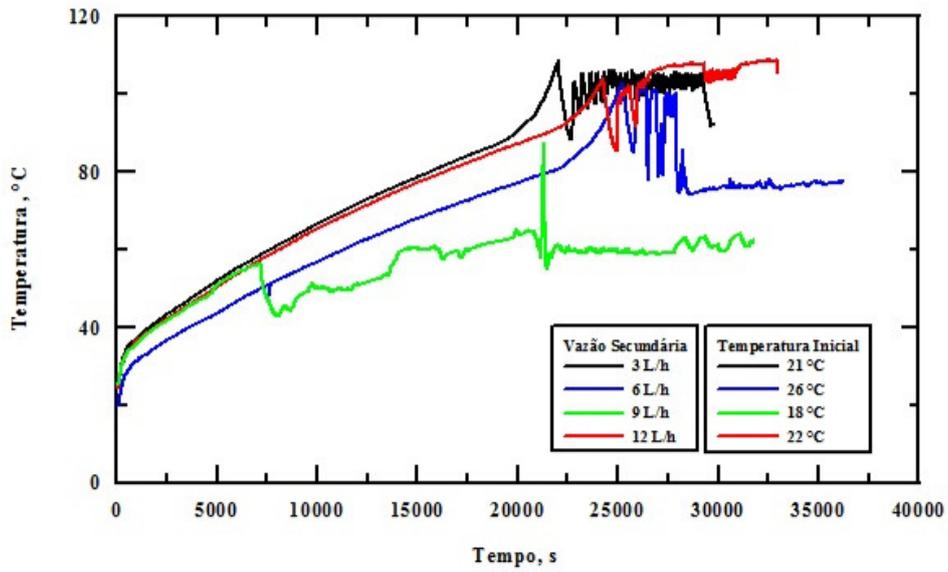


Figura 4.131: Temperaturas na Perna Quente - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$, $Q_s = 6 \text{ l/h}$, $Q_s = 9 \text{ l/h}$ e $Q_s = 12 \text{ l/h}$

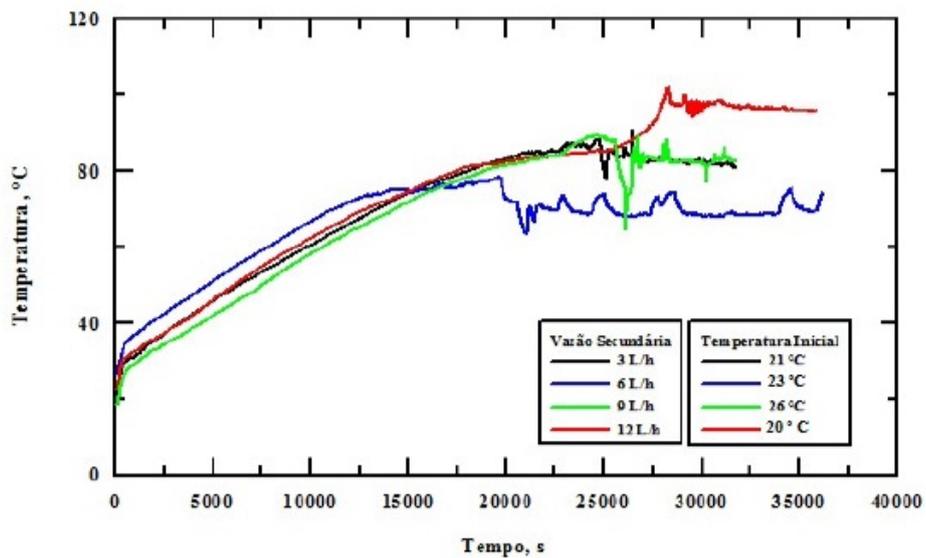


Figura 4.132: Temperaturas na Perna Quente - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$, $Q_s = 6 \text{ l/h}$, $Q_s = 9 \text{ l/h}$ e $Q_s = 12 \text{ l/h}$

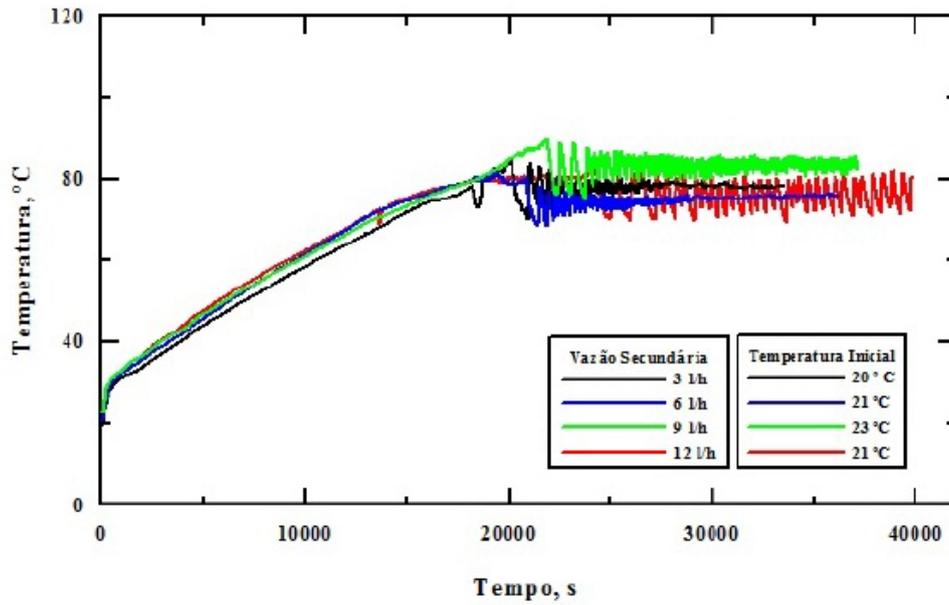


Figura 4.133: Temperaturas na Perna Quente - $P = 0,9 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$, $Q_s = 6 \text{ l/h}$, $Q_s = 9 \text{ l/h}$ e $Q_s = 12 \text{ l/h}$

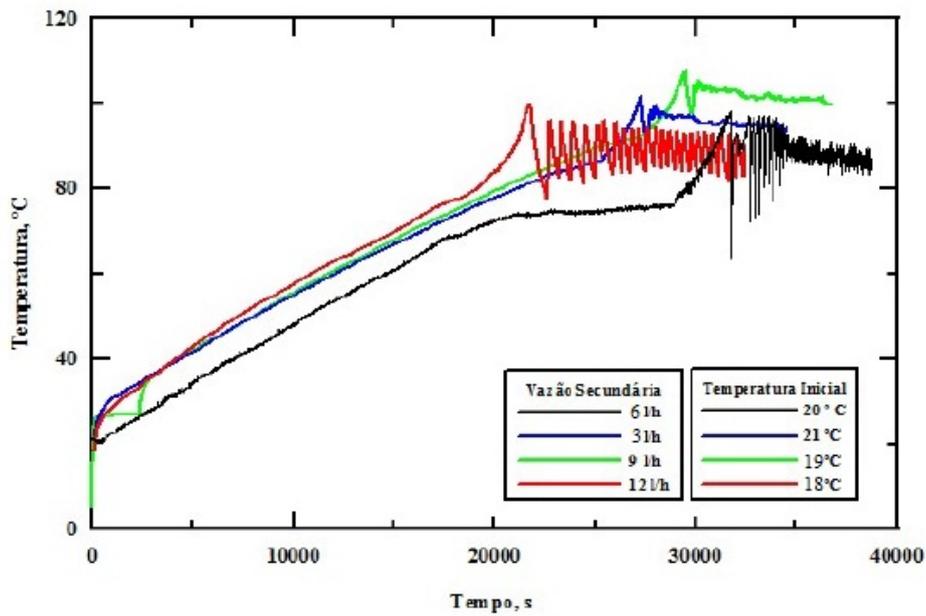


Figura 4.134: Temperaturas na Perna Quente - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$, $Q_s = 6 \text{ l/h}$, $Q_s = 9 \text{ l/h}$ e $Q_s = 12 \text{ l/h}$

4.2.17 Resultados de Vazões na Perna Fria

As Figuras 4.135 a 4.138 mostram as evoluções de vazões de circulação natural na perna fria com potências elétricas, $P = 1,1$ kW, $P = 1,0$ kW e $P = 0,8$ kW, além de quatro vazões de água de resfriamento do trocador de calor, $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h.

O resultados foram obtidos através de planilha eletrônica e processados para plotagem da curva de vazão ao longo do tempo. Estes resultados servem para a observação do comportamento e medição da vazão de circulação natural.

As vazões de circulação natural na perna fria têm como ponto relevante as escalas de tempo dos regimes de escoamentos monofásico e bifásico, além do período de transição entre os regimes. A menos dos períodos de transição onde as vazões se elevam, no restante dos experimentos os comportamentos das vazões apresentam comportamentos semelhantes.

O trajeto da vazão tem seu curso da saída do trocador de calor até o down-comer. Este curso tem influência tanto do tanque de expansão quanto da saída do aquecedor, contribuindo para uma vazão com períodos de intermitência do escoamento.

O experimento realizado com vazão de $Q_s = 12$ l/h combinada com a potência de $P = 1,1$ kW, gerou um comportamento acima do valor esperado. Este comportamento pode estar associado ao enchimento do circuito primário e à temperatura da água de resfriamento.

As vazões na perna fria são medidas através de medidor de vazão eletromagnético, posicionado próximo à saída do trocador de calor. Estas medidas são obtidas com intervalos de 10 segundos, que corresponde ao tempo de aquisição do supervisor de aquisição e controle de dados.

Em todas as situações de medições de vazões foi verificado, que no período de transição de monofásico para bifásico, ocorre um "flooding", com elevação brusca do valor da vazão, ocorre o início de um escoamento bifásico com predominância de padrões de escoamento pistonado e agitado. Após este escoamento, os intervalos de intermitência passam a ser regulares e os padrões de escoamentos, passam a ser função da combinação da vazão secundária com a potência.

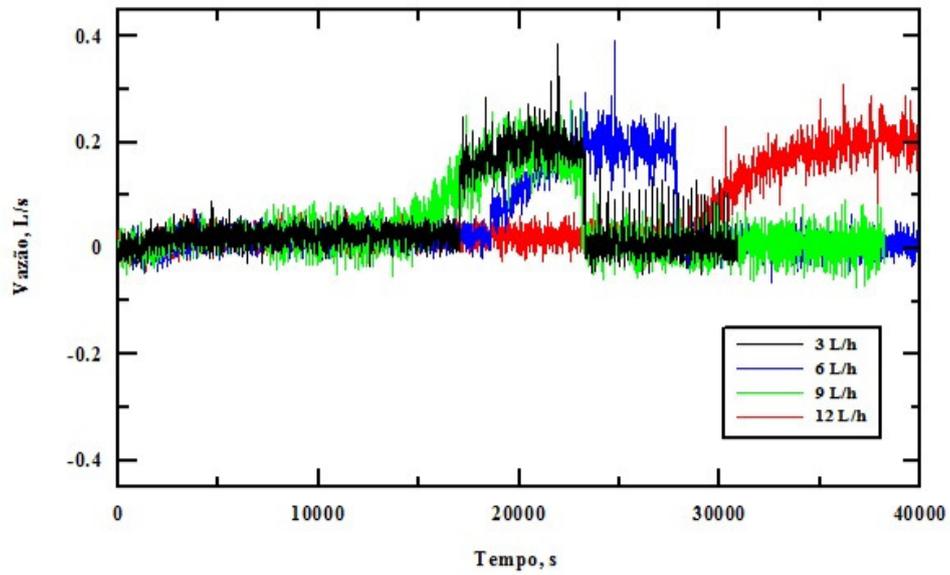


Figura 4.135: Vazões na Perna Fria - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$, $Q_s = 6 \text{ l/h}$, $Q_s = 9 \text{ l/h}$ e $Q_s = 12 \text{ l/h}$

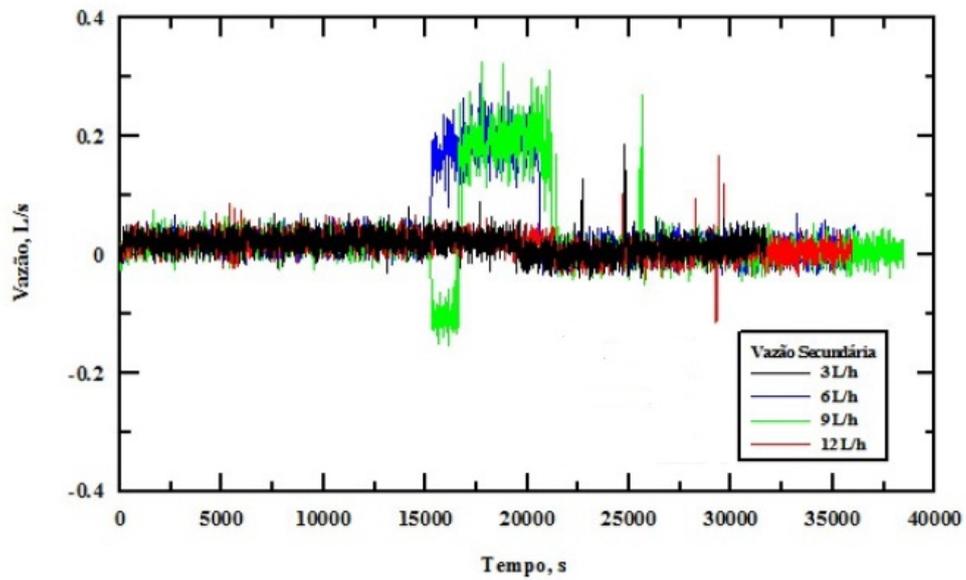


Figura 4.136: Vazões na Perna Fria - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$, $Q_s = 6 \text{ l/h}$, $Q_s = 9 \text{ l/h}$ e $Q_s = 12 \text{ l/h}$

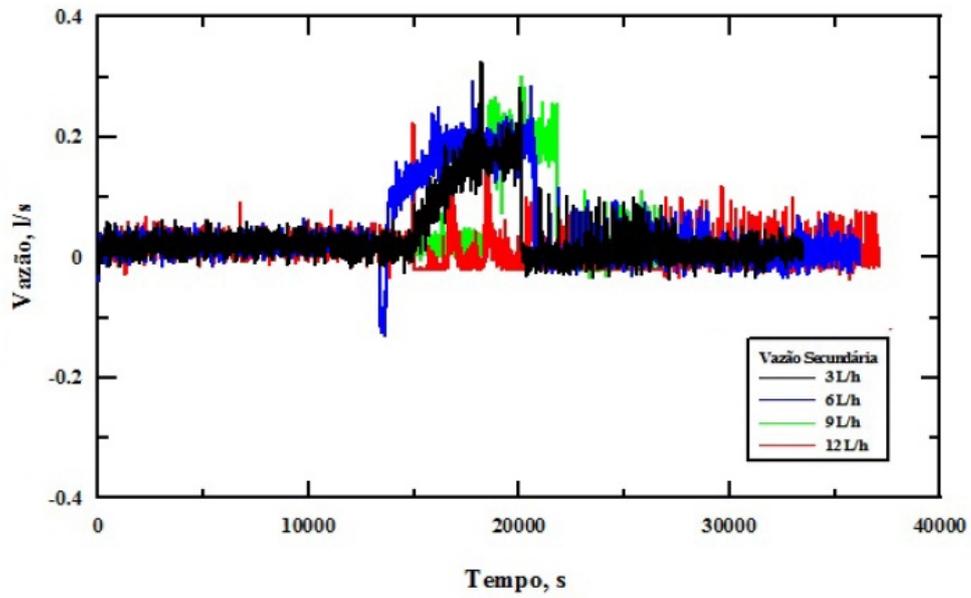


Figura 4.137: Vazões na Perna Fria - $P = 0,9$ kW - $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h

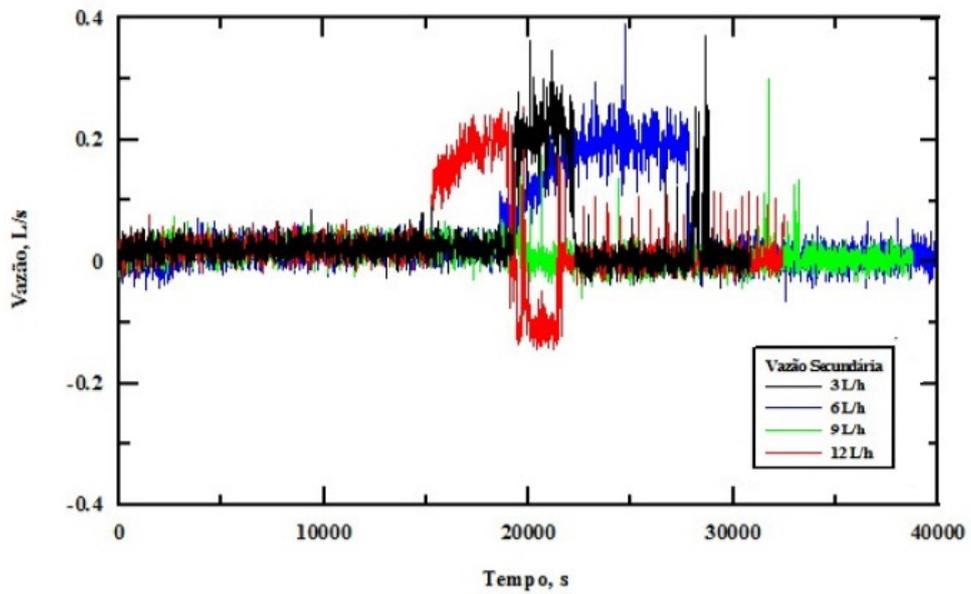


Figura 4.138: Vazões na Perna Fria - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h

4.2.18 Resultados de Comparações de Temperaturas entre Perna Quente e Perna Fria

As temperaturas observadas para combinações com potências mais altas e vazões de resfriamento secundário mais baixas, apresentaram comportamento com possibilidades da temperatura do fluido, escoando na seção secundária do trocador de calor, atingir o seu ponto de saturação, devido a menor troca de calor entre os sistemas primário e secundário.

As combinações de potências menores e altas vazões secundárias, como era esperado, apresentaram comportamento com melhor troca de calor entre o sistemas primário e secundário, além de estabilização da temperatura na fase de escoamento bifásico, conforme mostrado nas Figuras 4.139 e 4.150.

As temperaturas observadas no final do experimento apresentaram comportamento não compatível com o esperado, devido à formação de grande quantidade de vapor no aquecedor, entre as seções do downcomer e saída do aquecedor, causando diminuição de temperatura na perna quente, aumento de temperatura na perna fria e tanque de expansão, conforme mostrado na Figura 4.139.

Os valores das temperaturas com as combinações de potência $P = 1,1$ kW com $Q_s = 6$ l/h e $Q_s = 9$ l/h, $P = 1,0$ kW com $Q_s = 3$ l/h e $Q_s = 6$ l/h, apresentam temperaturas não compatíveis. A presença de ar no sistema, segundo observações nos experimentos iniciais, pode ter provocado estas situações atípicas das temperaturas.

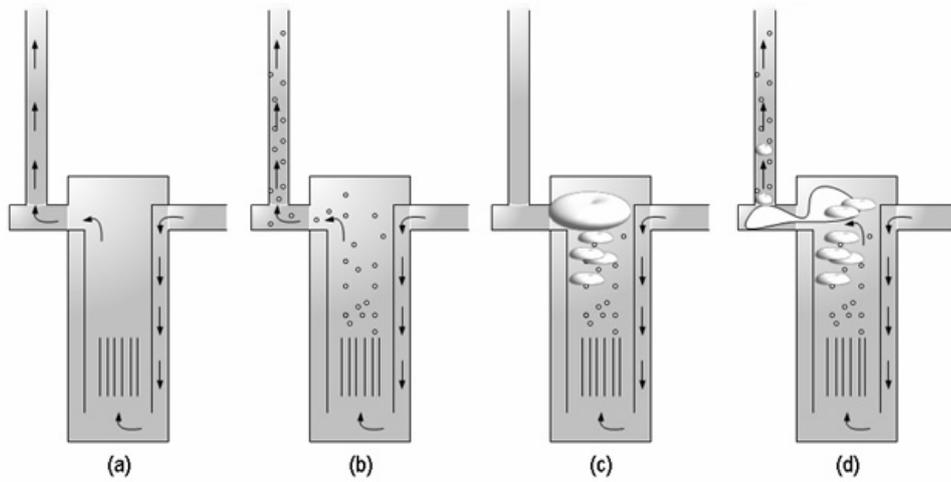


Figura 4.139: Formação de Bolha de Taylor

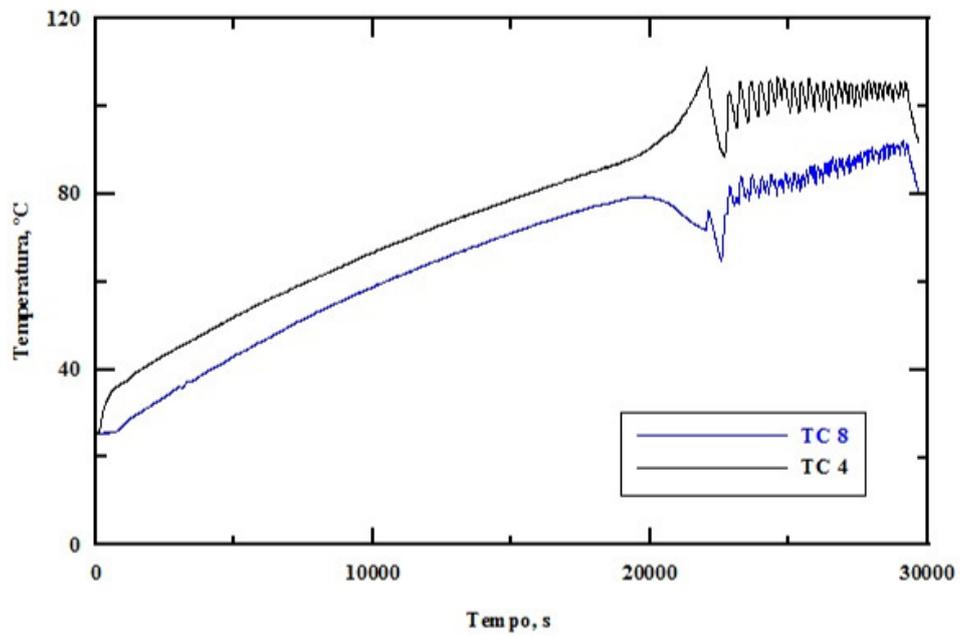


Figura 4.140: Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$

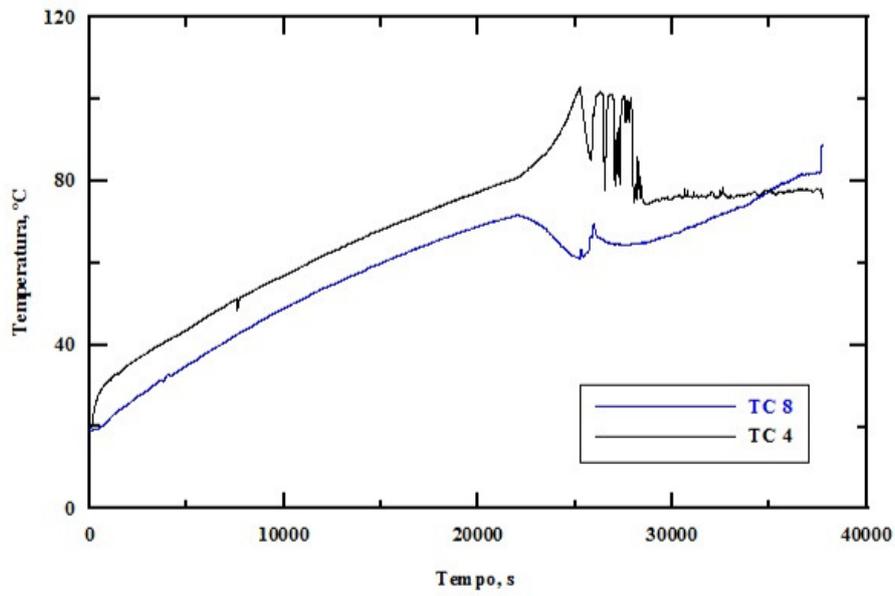


Figura 4.141: Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

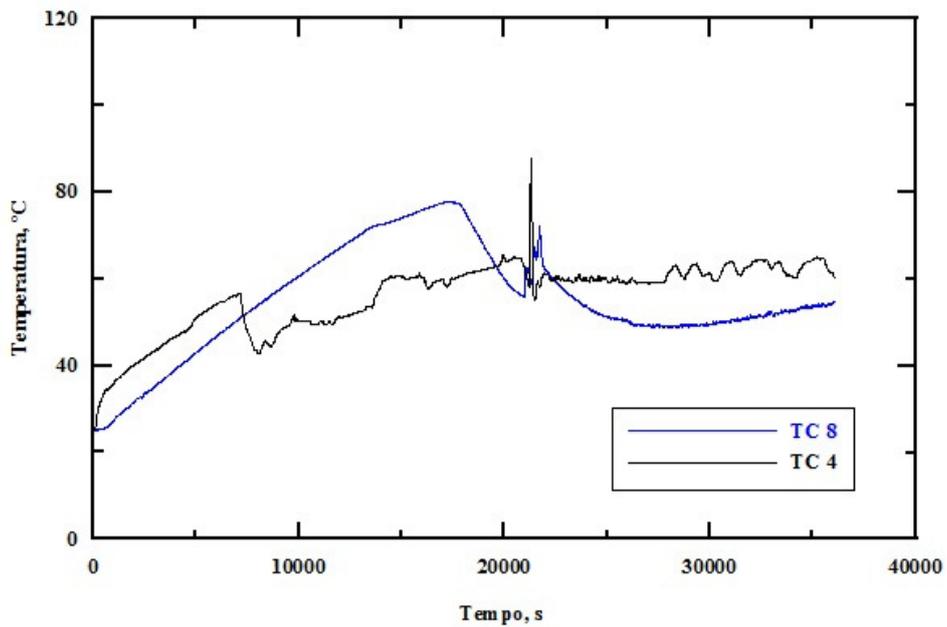


Figura 4.142: Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

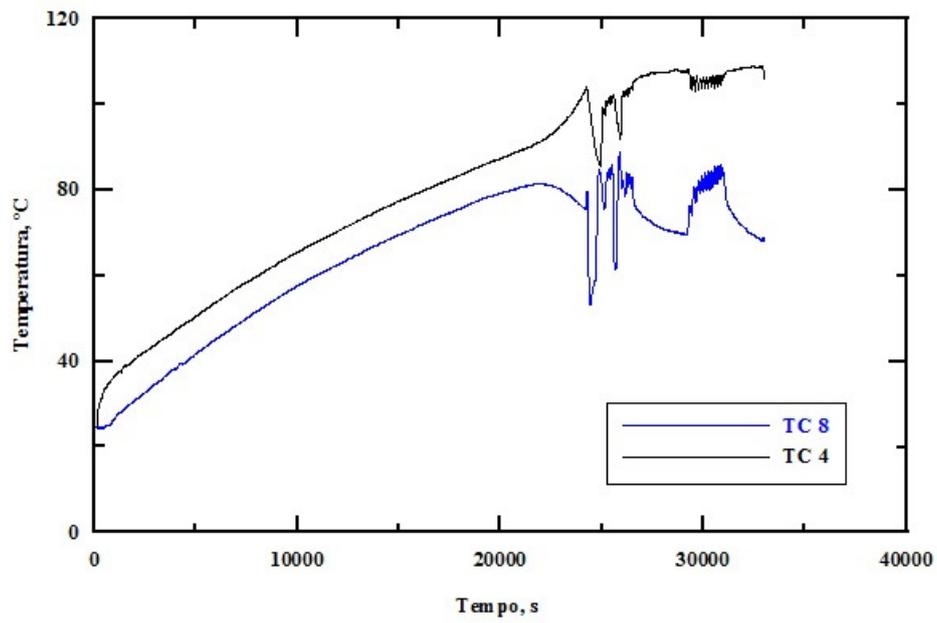


Figura 4.143: Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 1,1 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$

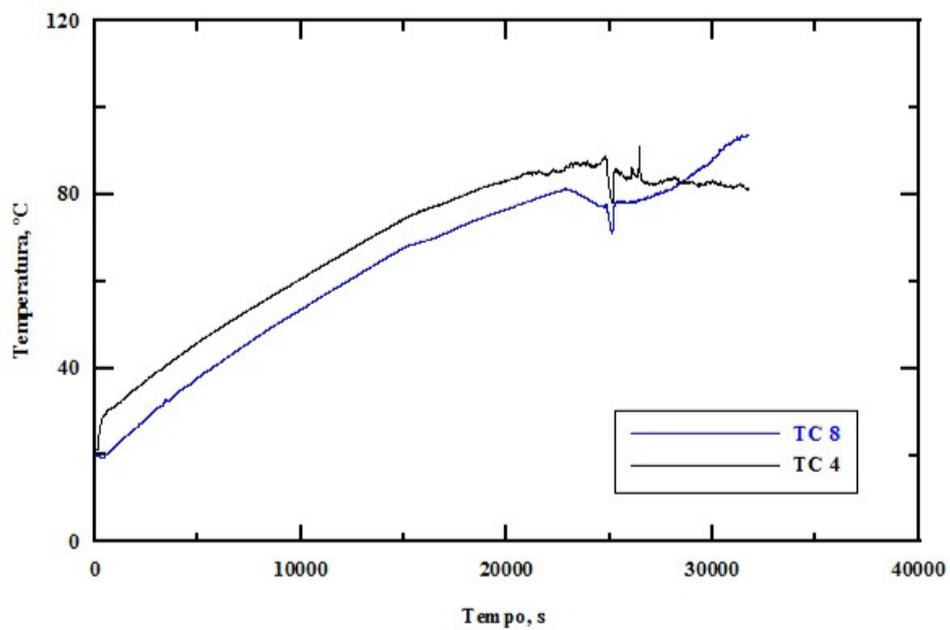


Figura 4.144: Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$

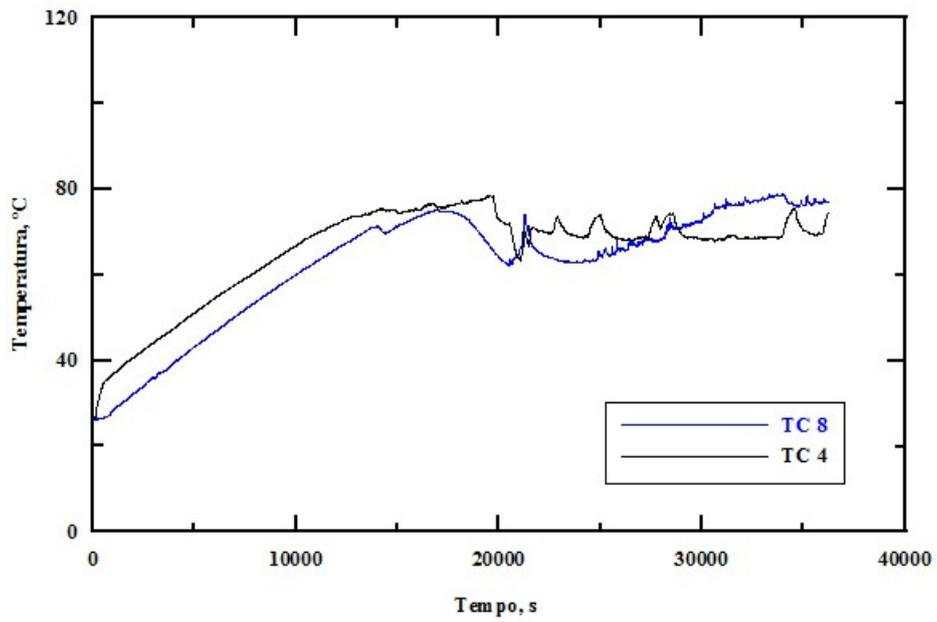


Figura 4.145: Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 6 \text{ l/h}$

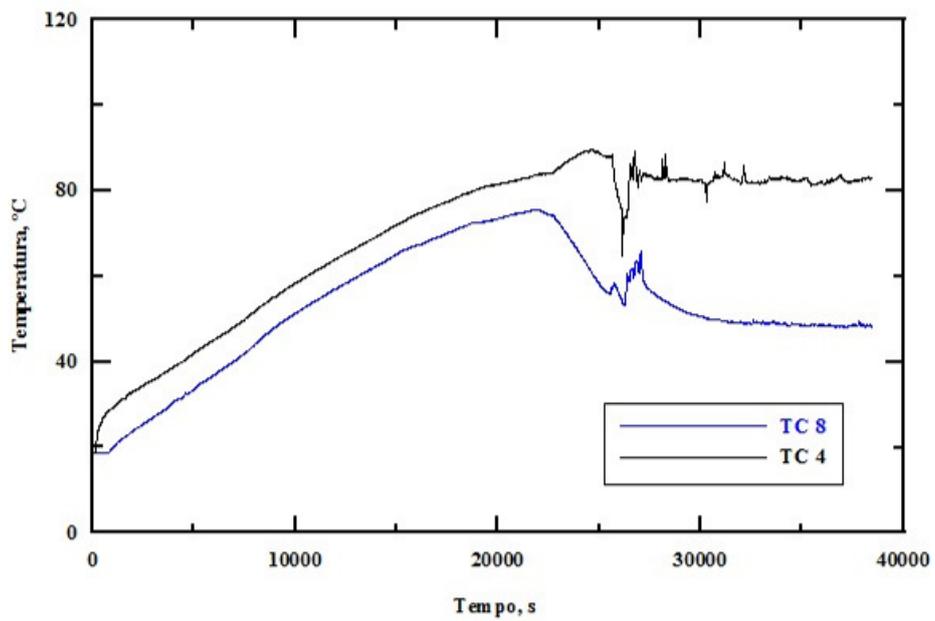


Figura 4.146: Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

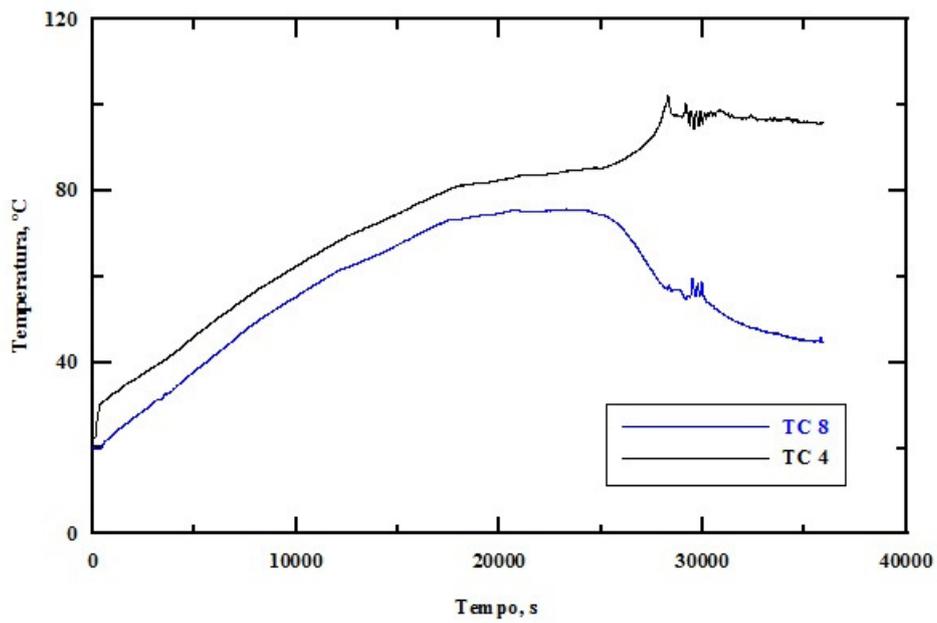


Figura 4.147: Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 1,0 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$

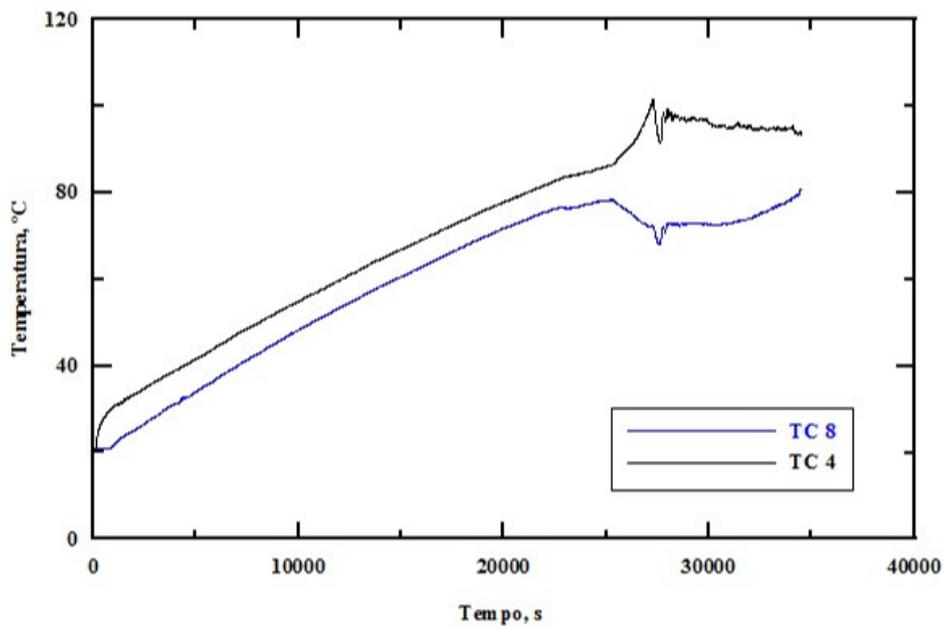


Figura 4.148: Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 3 \text{ l/h}$

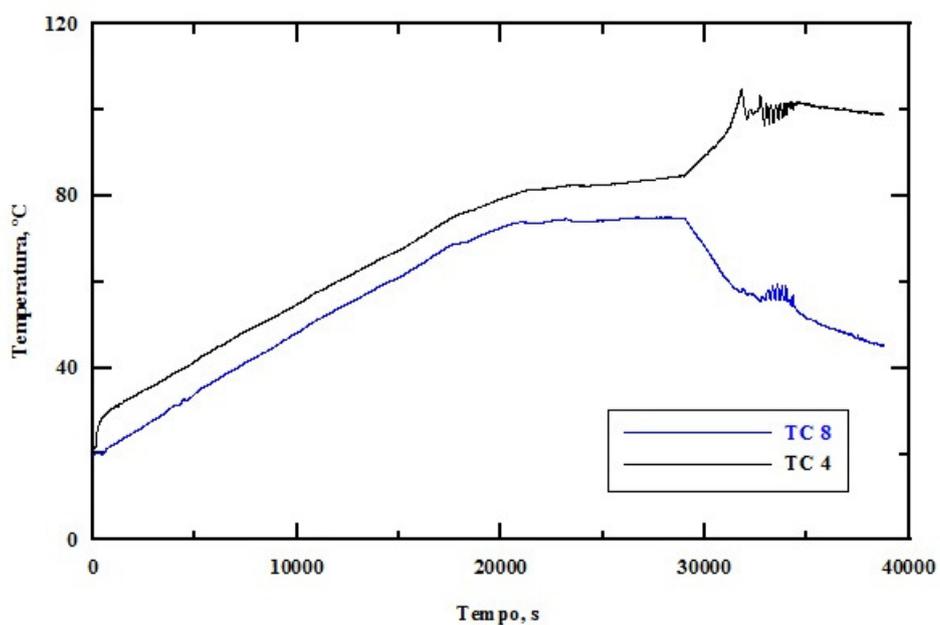


Figura 4.149: Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 9 \text{ l/h}$

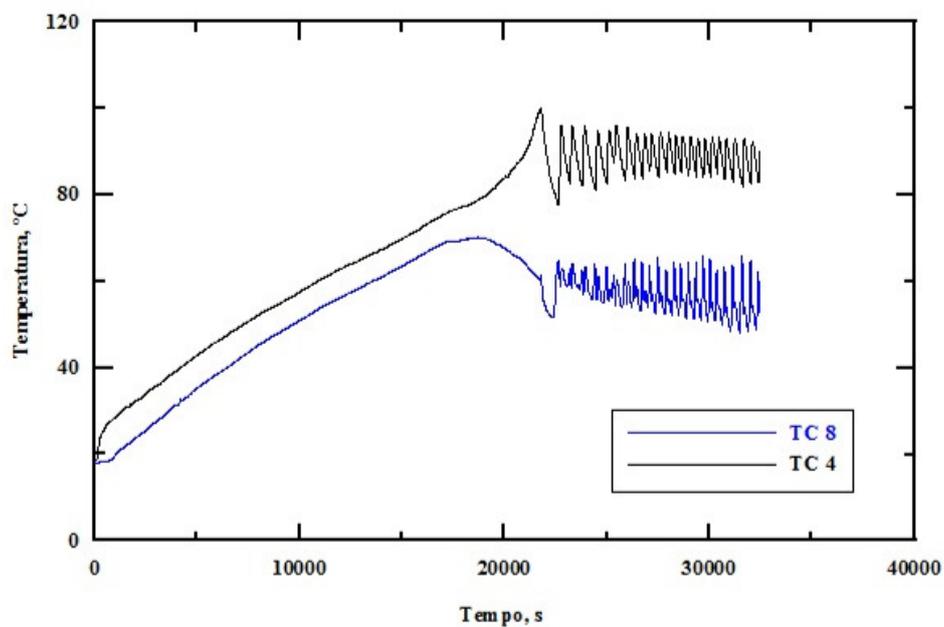


Figura 4.150: Temperaturas entre Perna Quente - Perna Fria - $P = 0,8 \text{ kW}$ - $Q_s = 12 \text{ l/h}$

4.2.19 Resultados das Comparações de Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior

As Figuras 4.151 a 4.161 mostram as diferenças de temperaturas entre diversos pontos do circuito hidráulico, com potências elétricas, $P = 1,1$ kW, $P = 1,0$ kW e $P = 0,8$ kW, além das quatro vazões secundárias de água de resfriamento do trocador de calor, $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h.

As temperaturas observadas no final do experimento apresentaram comportamento não compatível com as demais, devido à formação de grande quantidade de vapor no aquecedor, entre as seções do downcomer e saída do aquecedor, causando diminuição de temperatura na perna quente, aumento de temperatura na perna fria e tanque de expansão.

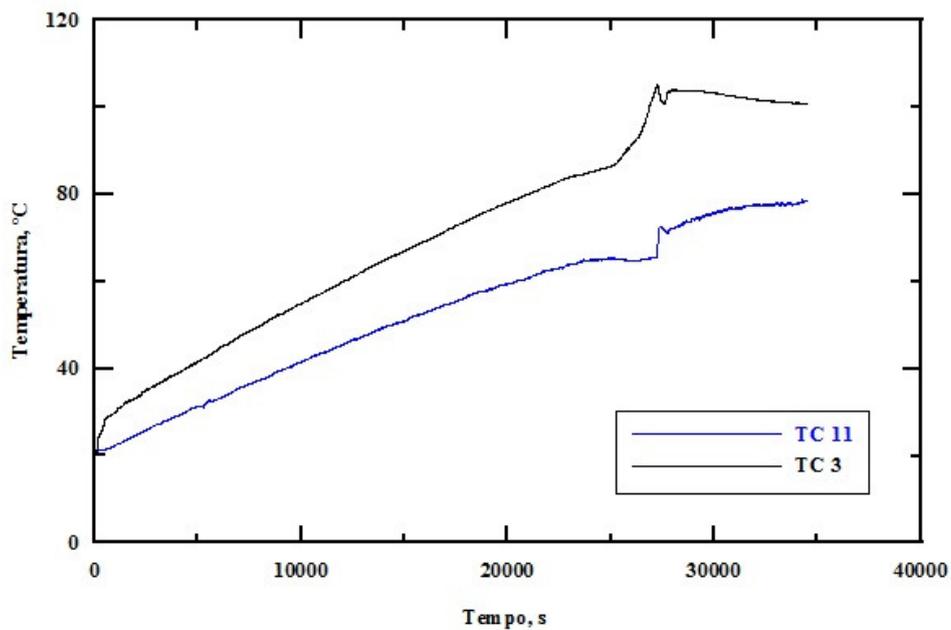


Figura 4.151: Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 3$ l/h

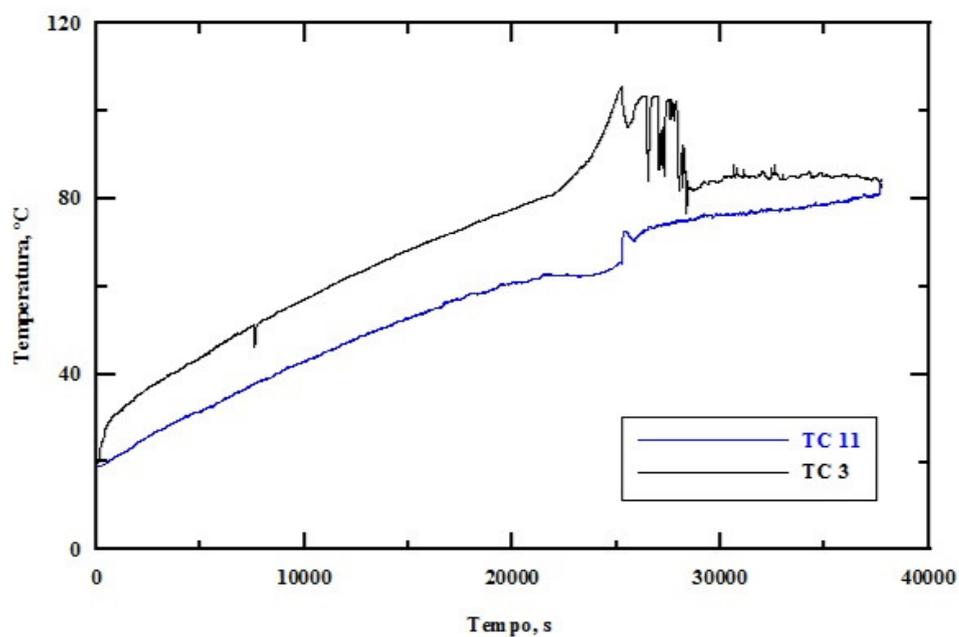


Figura 4.152: Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 6$ l/h

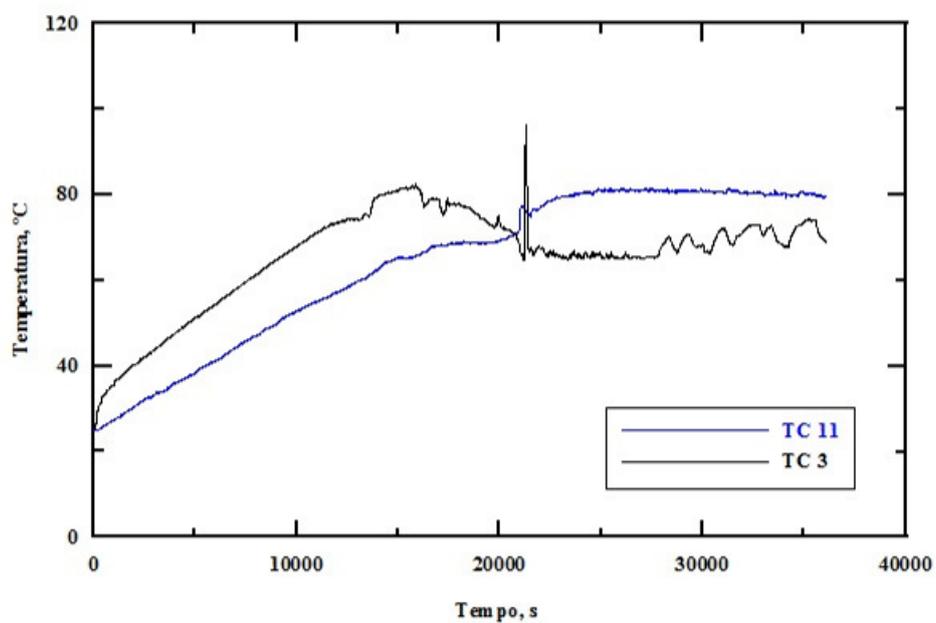


Figura 4.153: Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 9$ l/h

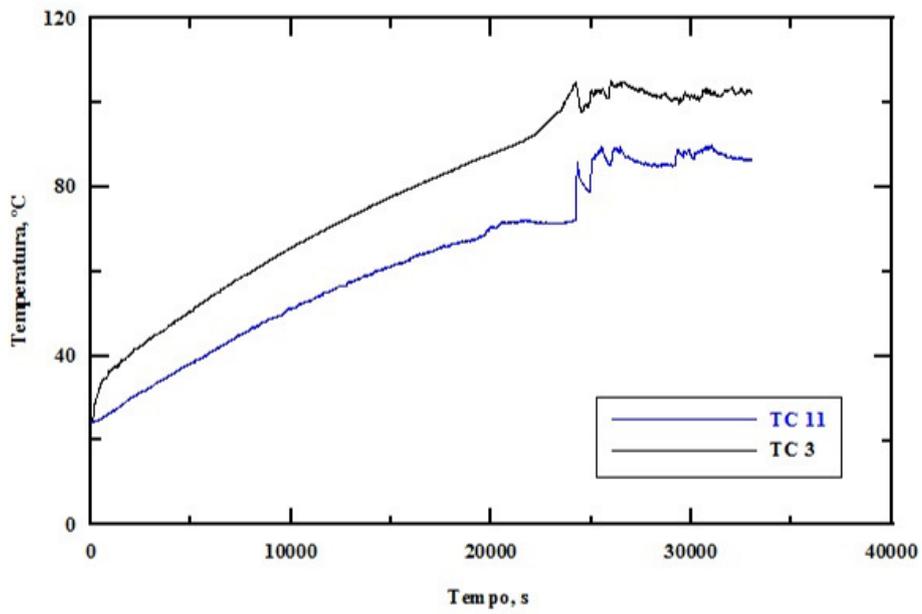


Figura 4.154: Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 1,1$ kW - $Q_s = 12$ l/h

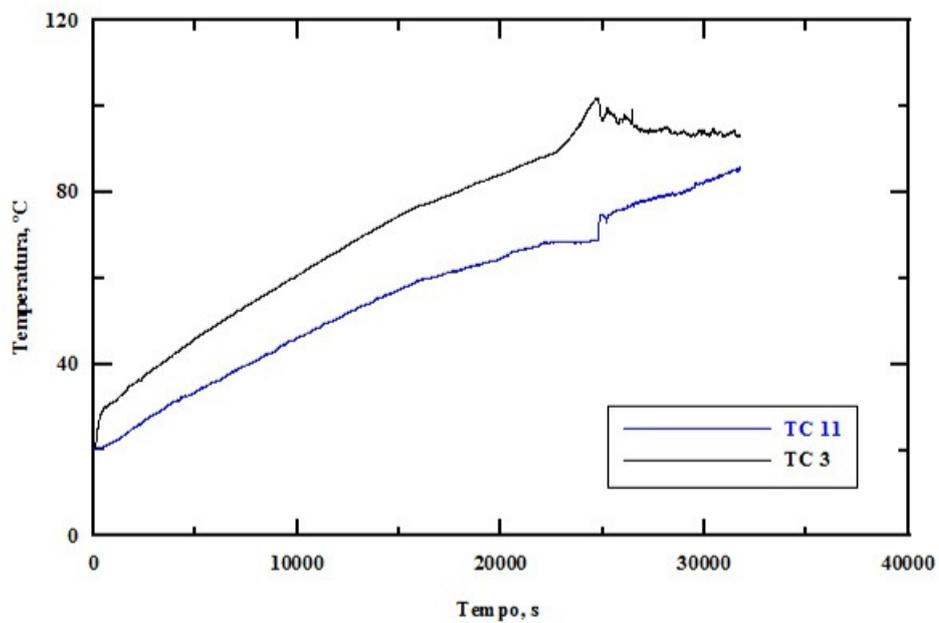


Figura 4.155: Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 1,0$ kW - $Q_s = 3$ l/h

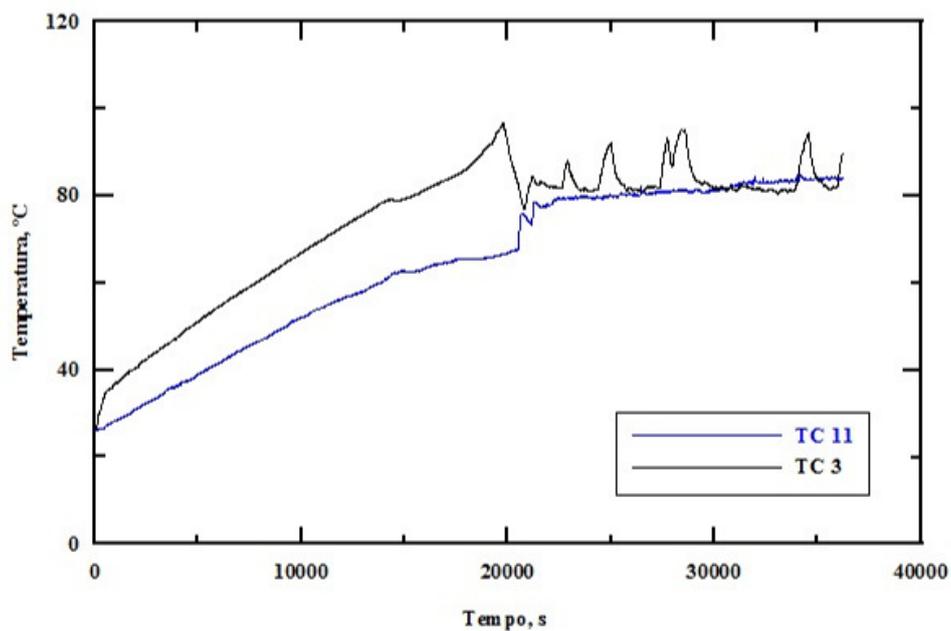


Figura 4.156: Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 1,0$ kW - $Q_s = 6$ l/h

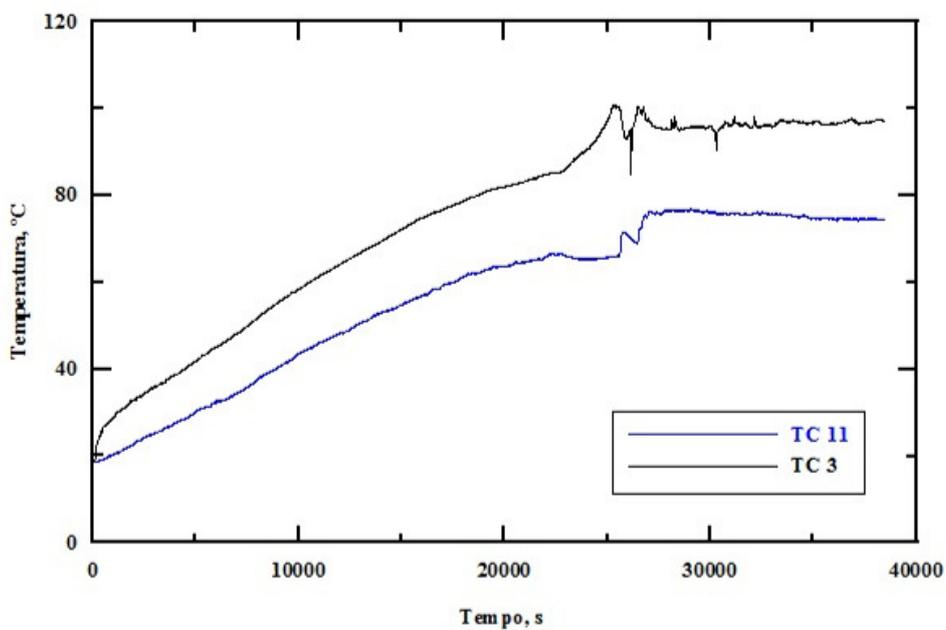


Figura 4.157: Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 1,0$ kW - $Q_s = 9$ l/h

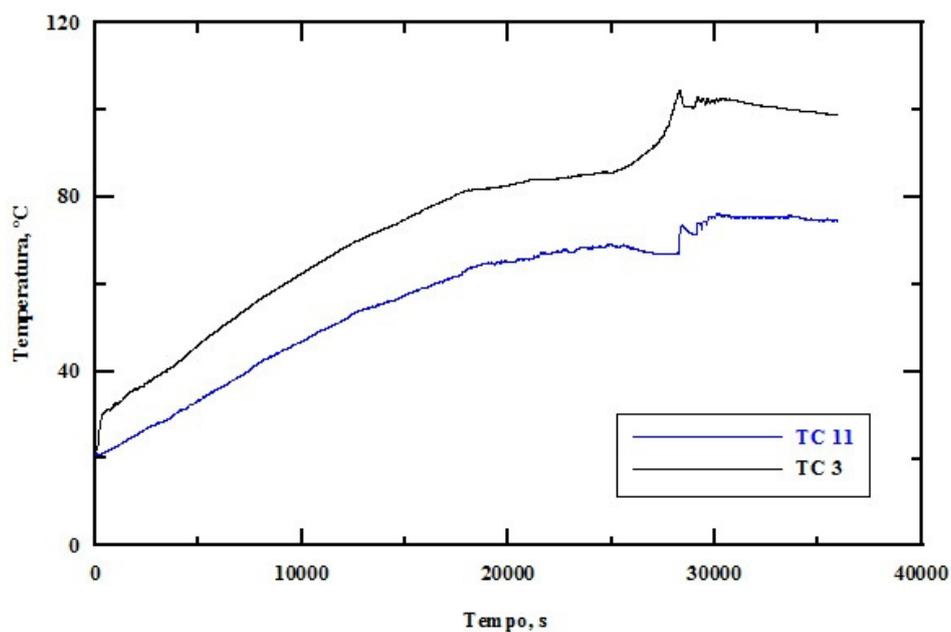


Figura 4.158: Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 1,0$ kW - $Q_s = 12$ l/h

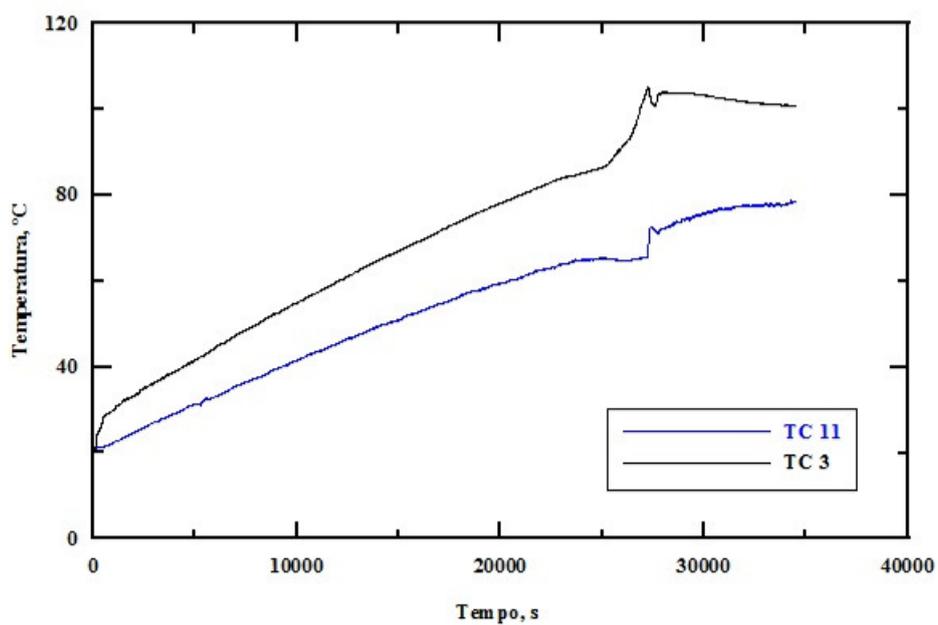


Figura 4.159: Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 3$ l/h

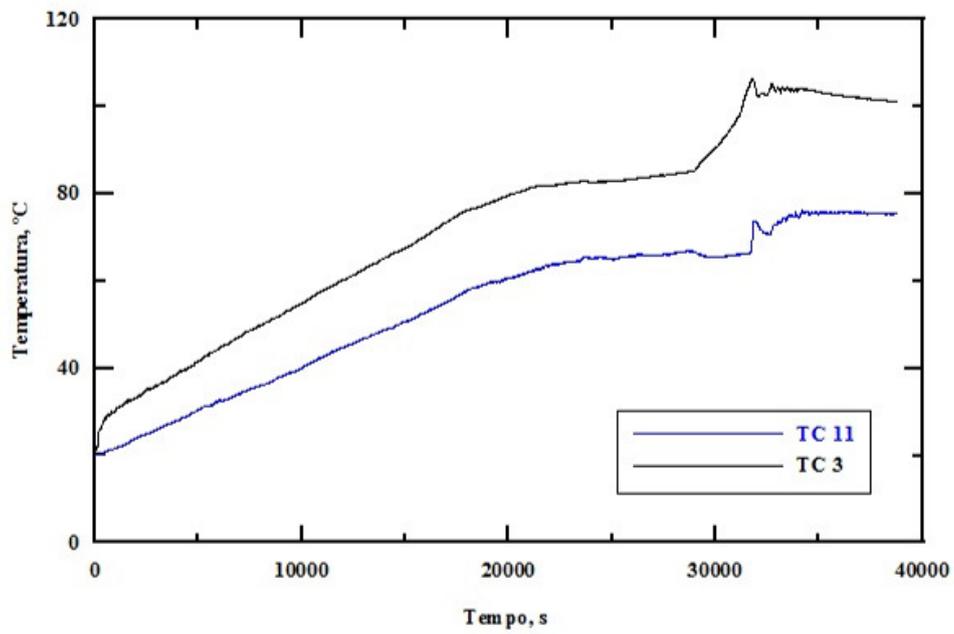


Figura 4.160: Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 9$ l/h

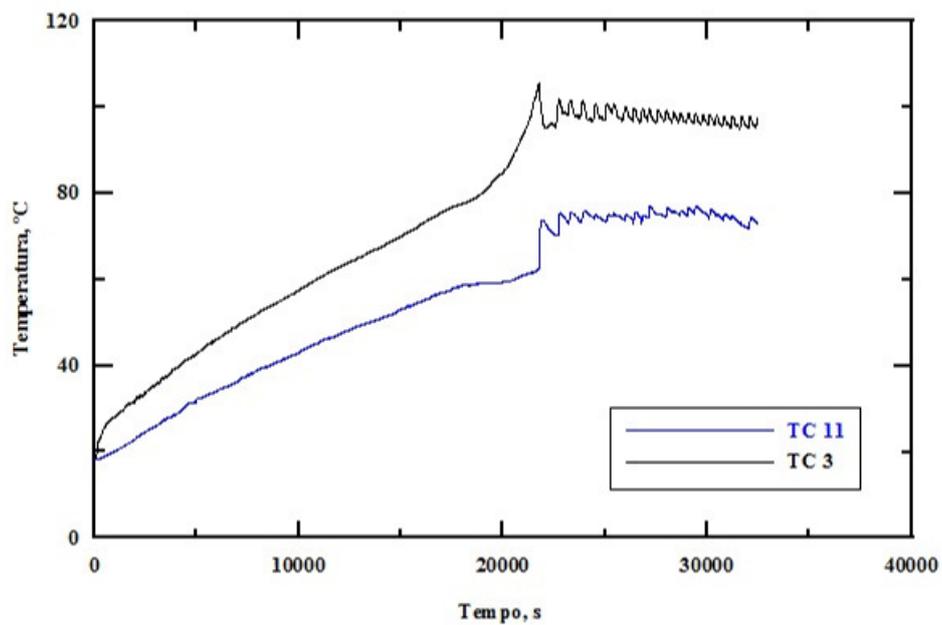


Figura 4.161: Temperaturas entre Saída do Aquecedor e Plenum Inferior - $P = 0,8$ kW - $Q_s = 12$ l/h

4.2.20 Vazões de Líquido na Perna Quente

As curvas da Figura 4.162 representam as medições de vazões de líquido na perna quente, obtidas com medidor de vazão ultrassônico Doppler, utilizando dados dos experimentos realizados com potência de $P = 0,9$ kW e vazões de resfriamento secundário de $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h. As vazões apresentaram valores bem próximos os valores de vazões verificados na perna fria.

Pode ser notado nas curvas, que as vazões em regime monofásico apresentam valores baixos e próximo a 20.000 segundos, tem-se o período de transição do regime monofásico para bifásico. A partir daí, ocorre o primeiro ciclo de escoamento bifásico de maior intensidade começando o regime bifásico.

As curvas permitem identificar que as vazões secundárias $Q_s = 6$ l/h e $Q_s = 9$ l/h, apresentam comportamentos mais estáveis e com baixos valores de vazões. O experimento com vazão de $Q_s = 3$ l/h apresenta uma tendência de não estabilização em regime contínuo. A vazão $Q_s = 12$ l/h apresenta grande variação de vazão, mas dentro de limite de estabilização.

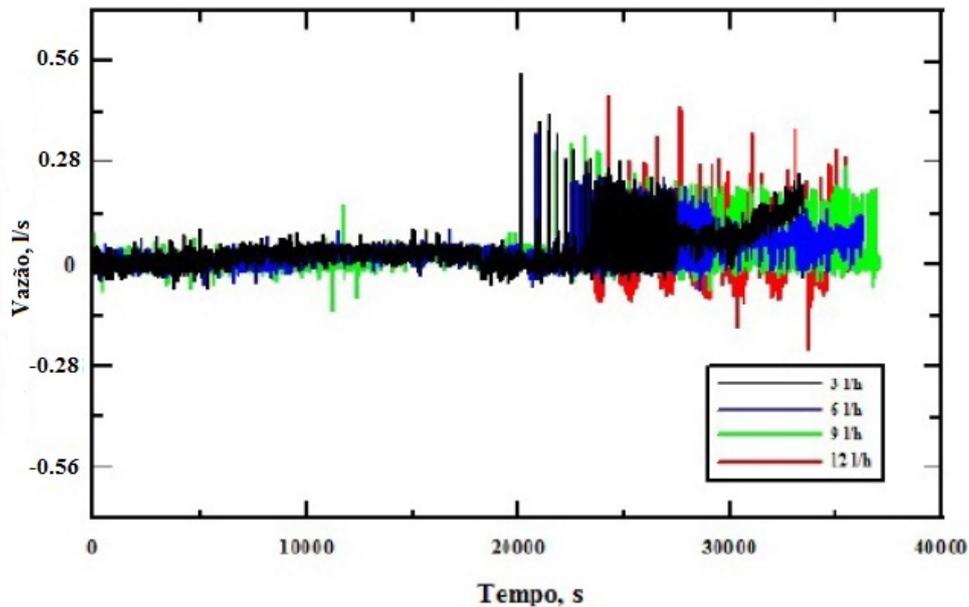


Figura 4.162: Vazões de Líquido na Perna Quente - $P = 0,9$ kW - $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h

4.2.21 Velocidade de Líquido na Perna Quente

As curvas da Figura 4.163 foram apresentadas para verificação do comportamento da velocidade do líquido. O comportamento desta velocidade seguiu o mesmo padrão da vazão, como era esperado. Em comparação com as velocidades das bolhas, a faixa observada de variação de valores de velocidades mostrou-se coerente com as velocidades de bolhas para esta condição de experimento.

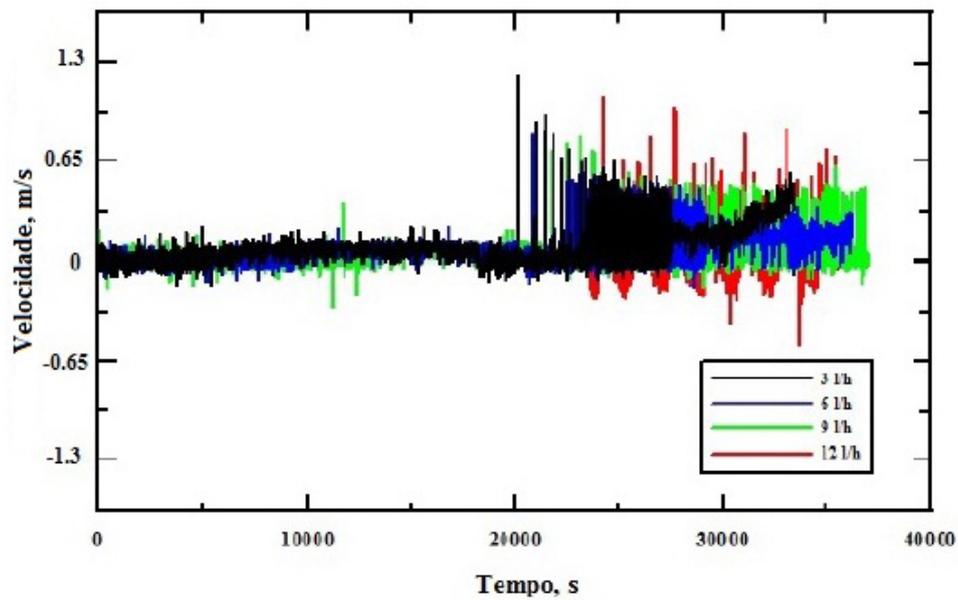


Figura 4.163: Velocidades de Líquido na Perna Quente - $P = 0,9$ kW - $Q_s = 3$ l/h, $Q_s = 6$ l/h, $Q_s = 9$ l/h e $Q_s = 12$ l/h

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões

As informações extraídas dos experimentos foram obtidas em função das técnicas utilizadas, que cumpriram seu objetivo de medir ou captar dados, que após processados foram transformados em gráficos e tabelas para melhor amostragem do comportamento do circuito de circulação natural. Os resultados foram importantes para o objetivo de permitir a análise da circulação natural bifásica e ratificar a importância do circuito experimental.

As velocidades de bolhas foi um indicador de dispersão das bolhas de vapor, se comparadas com os comprimentos de bolhas. As frações de vazios calculadas através de técnica ultrassônica, apresentaram comportamento satisfatório e comprovadas com as comparações com as imagens processadas.

Pra a continuação deste trabalho é de grande importância o cálculo de perdas de pressão na perna quente, provocados pela intermitência de escoamentos bifásicos, utilizando tanto a técnica ultrassônica quanto medidores de ultra-baixa pressão.

5.1 Conclusões

As medições experimentais de velocidades e comprimentos de bolhas foram executadas para escoamentos bifásicos de circulação natural, através de dezesseis combinações a partir de quatro níveis de potências elétricas e quatro níveis de vazões volumétricas de água de resfriamento secundário. Estas medições foram obtidas por meio de sistema de visualização por câmera de alta velocidade, técnicas ultrassônicas

tipo pulso-eco e técnica Doppler.

Os histogramas e correlações envolvendo velocidades apresentaram melhores resultados nas curvas de distribuição normal e gráficos de correlações. Em relação às análises em torno de comprimentos de bolhas verificou-se uma grande dispersão em razão de diversidade de resultados de comprimentos de bolhas.

Em algumas combinações de potências elétricas e vazões de resfriamento, as distribuições normais de comprimentos e velocidades de bolhas apresentaram comportamento mais comportado, enquanto que para outros casos, as distribuições pareceram bastante irregulares. A identificação de existência de regime de escoamento tipo bolha de Taylor de forma bem comportada foi observada por um curto intervalo de tempo nas condições de funcionamento. Apesar de não haver forte correlação entre os comprimentos e velocidades de bolhas, foi importante verificar os padrões de escoamento bifásicos presentes nos experimentos e cálculo de parâmetros interfaciais.

As correlações foram fracas quando os comprimentos de bolhas e distribuições de velocidades estiveram irregulares. Pode-se concluir que o escoamento em circulação natural bifásica é muito diferente do escoamento de gás-líquido em um tubo vertical adiabático, sendo necessário mais pesquisas para melhorar o entendimento e modelagem da dinâmica de bolhas do sistemas de circulação natural bifásico.

Nas análises executadas dos histogramas gráficos, considerando todas as potências e vazões secundárias de resfriamento, verificou-se as tendências dos respectivos comportamentos dos experimentos de acordo com as combinações das variáveis de entrada. Pela geração de bolhas com comprimentos mais concentrados e equivalentes às bolha de Taylor e pistonado, as potências $P = 1,1$ kW e $P = 1,0$ kW, combinadas com vazão $Q_s = 9$ l/h apresentaram resultados mais comportados. Da mesma forma, as potências $P = 0,9$ kW e $P = 0,8$ kW, combinadas com vazão de $Q_s = 6$ l/h, estiveram num padrão mais regular.

O trabalho cumpriu seu objetivo de investigar o comportamento do Circuito de Circulação Natural, com o intuito de extrair informações relevantes para análise das influências das potências elétricas e vazões de resfriamento secundário, no funcionamento do circuito sob circulação natural bifásica. Além disso, as experiências adquiridas na execução do trabalho tornou possível identificar melhorias a ser im-

plementadas para otimização dos resultados.

Este trabalho apresentou informação relevante na verificação do comportamento do experimento, em relação à medição de temperaturas por termopares, à vazão de circulação natural, à velocidade de líquido na perna quente, à verificação de padrões de escoamentos, pela comparação com as imagens obtidas da câmera de alta velocidade e técnicas ultrassônicas.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A execução de experimentos para potências complementares em toda faixa de potência disponível do Circuito de Circulação Natural, $P = 0,7$ kW, $P = 1,2$ kW, $P = 1,3$ kW, $P = 1,4$ kW e $P = 1,5$ kW, apresentaria uma grande contribuição para a construção de uma matriz de potência versus vazão de refrigeração secundário, em complemento a este trabalho.

Novos experimentos com potências variando de $P = 0,5$ kW a $P = 0,9$ kW, deverão ser executados com $Q_s = 6$ l/h para verificação do desempenho do sistema. Pela mesma razão, para potências variando de $P = 1,0$ kW a $P = 1,5$ kW deverá ser utilizada a vazão $Q_s = 9$ l/h.

A técnica ultrassônica foi utilizada no tubo de vidro e, posteriormente, ao tubo de aço inoxidável que é o material das tubulações das instalações nucleares, ocasionando espalhamento da onda ultrassônica e dificuldades no processamento de sinais. A instalação dos transdutores no tubo de vidro possibilitará melhores resultados.

A implantação de modo de sincronização na aquisição de sinais, utilizando técnicas ultrassônicas com a técnica de visualização em alta velocidade possibilitará a comparação dos diversos dados e eventos em tempo real, permitindo uma análise mais apurada dos resultados.

A aquisição de sinais ultrassônico pode apresentar melhores resultados com o aprimoramento do programa da aquisição e gravação dos dados de sinais ultrassônicos para obtenção de sinais com menos influência de ruídos e desenvolver aplicativo para tratamento dos sinais permitindo a medição dos parâmetros em tempo real.

Com a implementação de sensores de pressão e componentes de medição, além

das atualizações do sistema supervisorio, novas contribuições serão agregadas ao experimento, dotando-o de variadas formas de análise do comportamento da circulação natural.

O Circuito de Circulação Natural pela sua similaridade e escalonamento, em relação ao protótipo do Sistema de Remoção de Calor Residual, pode ser avaliado e permitir a escolha das combinações que possam apresentar melhor desempenho para a finalidade que se destinam.

Referências Bibliográficas

- Akita, K. e Yoshida, F. (1974). Bubble size, interfacial area, and liquid-phase mass-transfer coefficient in bubble columns. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 13(1):84–91.
- Andrade, D. A., Sabundjian, G., Umbehaun, P. E., Torres, W. M., Belchior Jr., A., Rocha, R. T. V., Fernandes, T. D. J., e Carvalho, A. D. (2005). Simulação e análise do fenômeno de circulação natural monofásica e bifásica no circuito experimental instalado na engenharia química Poli-USP, com Relap-5. In *INAC - International Nuclear Atlantic Conference*.
- Andria, G., Attivissimo, F., e Giaquinto, N. (2001). Digital signal processing techniques for accurate ultrasonic sensor measurement. *Measurement*, 30:105–114.
- Aritomi, M., Chiang, J. H., Nakahashi, T., Wataru, M., e Mori, M. (1992). Fundamental study on thermo-hydraulics during start-up in natural circulation boiling water reactors (I), thermo-hydraulics instabilities. *Nuclear Science and Technology*, 29(7):631–641.
- Babelli, I., Revankar, S. T., e Ishii, M. (1994). Flow visualization study of post-critical heat flux in inverted flow. *Nuclear Engineering and Design*, 146:15–24.
- Barnea, D. e Shemer, L. (1989). VERTICAL SLUG FLOW : APPLICATIONS TO SLUG. *Int. J. Multiphase Flow*, 15(4):495–504.
- Botelho, D. A. (1992). Análise simplificada de sistemas passivos de remoção de calor residual de reatores PWR de pequeno porte. Technical report, IEN - Instituto de Engenharia Nuclear.

- Botelho, D. A. (1993). Circuitos termo hidráulicos em escala reduzida de baixa pressão para estudos de remoção de calor por circulação natural de reatores PWR. Technical report, IEN - Instituto de Engenharia Nuclear.
- Botelho, D. A., Sampaio, P. A. B., Moreira, M. L., e Faccini, J. L. H. (2002). Two-phase natural circulation similarity criteria for passive nuclear reactor cooling systems under normal and maximum velocity conditions. Technical Report RT-IEN- 01/2002 parte 1, IEN - Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro.
- Carelli, M., Conway, L., Dzodzo, M., Maioli, A., Oriani, L., Storrick, G., Petrovic, B., Achilli, A., Cattadori, G., Congiu, C., Ferri, R., Ricotti, M., Papini, D., Bianchi, F., Meloni, P., Monti, S., Berra, F., Gergic, D., Yoder, G., Alemberti, A., e Zvirim, Y. (2009). The SPES3 experimental facility design for the IRIS reactor simulation. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 1:12.
- Carvalho, R. D. M., Venturini, O. J., Tanahashi, E. I., Neves, F., e França, F. A. (2009). Application of the ultrasonic technique and high-speed filming for the study of the structure of air-water bubbly flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33(7):1065–1086.
- Chang, J. S. e Morala, E. C. (1990). Determination of two-phase interfacial areas by an ultrasonic technique. *Nuclear Engineering and Design*, 122:143–156.
- Chen, J., Shi, Y., e Shi, S. (1999). Noise analysis of digital ultrasonic nondestructive evaluation system. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 76(9):619–630.
- Chen, L., Tian, Y. S., e Karayiannis, T. G. (2006). The effect of tube diameter on vertical two-phase flow regimes in small tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(21-22):4220–4230.
- Cherubini, M., Giannotti, W., Araneo, D., e D’Auria, F. (2008). Use of the natural circulation flow map for natural circulation systems evaluation. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 1:7.

- Chiang, J. H., Aritomi, M., e Mori, M. (1993). Fundamental study on thermo-hydraulics during start-up in natural circulation boiling water reactors (II), natural circulation oscillation induced by hydrostatic head fluctuation. *Nuclear Science and Technology*, 30(3):203–211.
- Chiang, J. H., Aritomi, M., Mori, M., e Higuchi, M. (1994). Fundamental study on thermo-hydraulics during start-up in natural circulation boiling water reactors (III), effects of system pressure on geysering and natural circulation oscillation. *Nuclear Science and Technology*, 31(9):883–893.
- Choi, J. H. (2010). Integral test facilities for validation of the performance of passive safety systems and natural circulation. In *Pacific Basin Nuclear Conference*, páginas 11–14, Mexico.
- Coleman, J. W. e Garimella, S. (1999). Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42:2869–2881.
- Cunha Filho, J. S. (2010). *Estudo experimental de escoamento bifásico em tubo circular inclinado usando técnicas ultra-sônicas e de visualização*. PhD thesis, Coordenação de Pós-Graduação de Programa de Engenharia - COPPE - UFRJ.
- D’Auria, F. e Frogheri, M. (2000). Natural circulation limits achievable in a PWR. In *IAEA - Nuclear Power Technology Development Section*, páginas 97–114, Vienna.
- Delmastro, D. F. (2000). Thermal-hydraulic aspects of CAREM reactor. In *IAEA - Nuclear Power Technology Development Section*, páginas 67–72, Vienna.
- Dinh, T. B. e Choi, T. S. (1999). Application of image processing techniques in air/water two phase flow. *Mechanics Research Communication*, 26(4):463–468.
- Faccini, J. L. H. (2008). *Estudo de escoamentos bifásicos estratificados usando técnicas ultra-sônicas*. PhD thesis, Coordenação de Pós-Graduação de Programa de Engenharia- COPPE - UFRJ.
- Fukuda, K., Kato, A., e Hasegawa, S. (1984). Two-phase flow instability at low flow rate conditions. *Nuclear Science and Technology*, 21(7):491–500.

- Fukuda, K. e Kobori, T. (1979). Classification of two-phase flow instability by density wave oscillation model. *Nuclear Science and Technology*, 16(2):95–108.
- Gartia, M. R., Vijayan, P. K., e Pilkhwal, D. S. (2006). A generalized flow correlation for two-phase natural circulation loops. *Nuclear Engineering and Design*, 236:1800–1809.
- Guanghai, S., Dounan, J., Fukuda, K., e Yujun, G. (2002). Theoretical and experimental study on density wave oscillation of two-phase natural circulation of equilibrium quality. *Nuclear Engineering and Design*, 215:187–198.
- Harmath, T. Z. (1960). Velocity of large drops and bubbles in medi of infinite or restricted extent. *AIChE Journal*, 6:281–288.
- He, W. e Edwards, R. M. (2008). Stability analysis of a two-phase test loop. *Annals of Nuclear Energy*, 35:525–533.
- Hibiki, T. e Ishii, M. (2000). Experimental study on hot-leg u-bend two-phase natural circulation in a loop with a large diameter pipe. *Nuclear Engineering and Design*, 195:69–84.
- Hsieh, C. C., Wang, S. B., e Pan, C. (1997). Dynamic visualization of two-phase flow patterns in a natural circulation loop. *Int. J. Multiphase Flow*, 23(6):1147–1170.
- Hsu, J. T., Ishii, M., e Hibiki, T. (1998). Experimental study on two-phase natural circulation and flow termination in a loop. *Nuclear Engineering and Design*, 186:395–409.
- Ishii, M. e Kataoka, I. (1984). Scaling laws for thermal-hydraulic system under single-phase and two-phase natural circulation. *Nuclear Engineering and Design*, 81:411–425.
- Ishii, M., Revankar, S. T., Leonardi, T., Dowlati, R., Bertodano, M. L., Babelli, I., Wang, W., Pokharna, H., Ransom, V. H., Viskanta, R., e Han, J. T. (1998). The three-level scaling approach with application to the purdue university multi-dimensional integral test assembly PUMA. *Nuclear Engineering and Design*, 186(1-2):177–211.

- Jeng, H. R. e Pan, C. (1999). Analysis of two-phase flow characteristics in a natural circulation loop using the drift-flux model taking flow pattern change and sub-cooled boiling into consideration. *Annals of Nuclear Energy*, 26:1227–1251.
- Jiang, S. Y., Yao, M. S., Bo, J. H., e Wu, S. R. (1995). Experimental simulation study on start-up of 5mw nuclear heating reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 158:111–123.
- Jiang, S. Y., Zhang, Y. J., Wu, X. X., Bo, J. H., e Jia, H. J. (2000). Flow excursion phenomenon and its mechanism in natural circulation. *Nuclear Engineering and Design*, 202:17–26.
- Kawanishi, K., Tsijsje, A., Fujiwara, M., Kohriyama, T., e Nagumo, H. (1991). Experimental study on heat removal during cold leg small break LOCA's in PWR's. *Nuclear Science and Technology*, 28(6):555–569.
- Kim, J. M. e Lee, S. Y. (2000). Experimental observation of flow instability semi-closed two-phase natural circulation loop. *Nuclear Engineering and Design*, 196:359–367.
- Kirouac, G. J., Trabold, T. A., Vassallo, P. F., Moore, W. E., e Kumar, R. (1999). Instrumentation development in two-phase flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 20(2):79–93.
- Kocamustafaogullari, G. e Ishii, M. (1984). Scaling criteria for 2-phase flow loops and their application to conceptual 2x4 simulation loop design. *Nuclear Science and Technology*, 65(1):146–160.
- Krautkramer, J. e Krautkramer, H. (1977). *Ultrasonic testing of materials*, volume 2. Springer-Verlag, Berlim.
- Kumar, N., Rajalakshmi, R., Kulkarni, R. D., Sagar, T. V., Vijayan, P. K., e Saha, D. (2000). Experimental investigation in high pressure natural circulation loop. Technical Report BARC/2000/E/002, Bhabha Atomic Research Centre, India.

- Kuncoro, H., Rao, Y. F., e Fukuda, K. (1995). *Experimental study on the geysering mechanism in a closed two-phase thermosyphon*, volume 55 de *Memories of Faculty of Engineering*. Kyushu University, Japan.
- Lackermeier, U., Rudnick, C., Werther, J., Bredebusch, A., e Burkhardt, H. (2001). Visualization of flow structures inside a circulating fluidized bed by means of laser sheet and image processing. *Powder Technology*, 114(1-3):71–83.
- Lamy, C. A., Cunha Filho, J. S., Faccini, J. L. H., e Su, J. (2007). Experimental investigation of ultrasonic field in two-phase bubbly-flow using rigid steel sphere. In *Proceedings of COBEM 2007 19th International Congress of Mechanical Engineering*, Brasília.
- Lapa, C. M. F., de Sampaio, P. A. B., e Pereira, C. M. N. A. (2004). A new approach to designing reduced scale thermal-hydraulic experiments. *Nuclear Engineering and Design*, 229(2-3):205–212.
- Lee, S. Y. e Kim, Y. L. (1999). An analytical investigation of role of expansion tank in semi-closed two-phase natural circulation loop. *Nuclear Engineering and Design*, 190:353–360.
- Liu, Z. e Zheng, Y. (2006). PIV study of bubble rising behavior. *Powder Technology*, 168:10–20.
- Liu, Z. L., Zheng, Y., Jia, L., e Zhang, Q. K. (2005). Study of bubble induced flow structure using piv. *Chemical Engineering Science*, 60(13):3537–3552.
- Lu, D., Xiao, Z., e Chen, B. (2010). A new method to derive one set of scaling criteria for reactor natural circulation at single and two-phase conditions. *Nuclear Engineering and Design*, 240:3851–3861.
- Lynnworth, L. C. (1975). Industrial applications of ultrasound - a review II . measurements , tests , and process control using low-intensity ultrasound. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, su-22(2):71–101.

- Manera, A., Prasser, H. M., Lucas, D., e van der Hagen, T. H. J. J. (2006). Three-dimensional flow pattern visualization and bubble size distributions in stationary and transient upward flashing flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 32(8):996–1016.
- Manera, A., Van der Hagen, T. H. J. J., e Van Dam, H. (2005). On the determination of transit times during flow oscillations. *Annals of Nuclear Energy*, 32:693–711.
- Massignan, J. P. D., Nishida, M. Y., Daciuk, R. J., Neves Jr., F., Franjic, F. A., e Carvalho, R. D. M. (2007). Medição da fração de vazios em escoamentos bifásicos borbulhantes utilizando ultra-som. In *Anais do 4º PDPETRO*, páginas 1–10, Campinas, SP.
- Matikainen, L., Irons, G. A., Morala, E. C., e Chang, J. S. (1986). Ultrasonic system for the detection of transient liquid gas interfaces using the pulse-echo technique. *Review Of Scientific Instruments*, 57(8):1661–1666.
- Matsumoto, Y. e Yoshizawa, S. (2005). Behaviour of a bubble cluster in an ultrasound field. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 47(6-7):591–601. 5th World Congress on Computational Mechanics, Jul 07-12, 2002, Vienna, AUSTRIA.
- Matz, V., Smid, R., Starman, S., e Kreidl, M. (2009). Signal-to-noise ratio enhancement based on wavelet filtering in ultrasonic testing. *Ultrasonics*, 49(8):752–9.
- Mesquita, R. N., Masotti, P. H. F., Penha, R. M. L., Andrade, D. A., Sabundjian, G., Torres, W. M., e Macedo, L. A. (2012). Classification of natural circulation two-phase flow patterns using fuzzy inference on image analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 250:592–599.
- Misale, M. e Frogheri, M. (2001). Stabilization of a single-phase natural circulation loop by pressure drops. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 25:277–282.
- Murakawa, H., Kikura, H., e Aritomi, M. (2005). Application of ultrasonic doppler method for bubbly flow measurement using two ultrasonic frequencies. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29(7):843–850.

- Murao, Y., Araya, F., Iwamura, T., e Okumura, K. (1995). A concept of passive safety pressurized water reactor system with inherent matching nature of core heat generation and heat removal. *Nuclear Science and Technology*, 32(9):855–867.
- Nayak, A. K., Dubey, P., Chavan, D. N., e Vijayan, P. K. (2007). Study on the stability behavior of two-phase natural circulation systems using a four-equation drift-flux model. *Nuclear Engineering and Design*, 237:386–398.
- Nayak, A. K. e Vijayan, P. K. (2008). Flow instabilities in boiling two-phase natural circulation systems: A review. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 40:15.
- Nayak, A. K., Vijayan, P. K., Saha, D., Venkat Raj, V., e Aritomi, M. (1998). Adequacy of power-to-volume scaling philosophy to simulate natural circulation integral test facilities. *Nuclear Science and Technology*, 35(10):712–722.
- Ofuchi, C. Y. (2011). *Técnicas avançadas para análise de escoamentos bifásicos gás-líquido em golfadas*. PhD thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial- UTFPR.
- Oliveira, E. G. D. e Costa-Félix, R. P. B. (2008). Implantação da calibração de transdutores de ultra-som: Introdução. páginas 1–11.
- Paulino, K. L. G. (2007). Medidores ultrassônicos. Technical report, Programa de Engenharia Mecânica - Unicamp.
- Qiu, S., Takahashi, M., Jia, D., e Su, G. (2003). Density wave stability of sodium boiling two-phase flow in a vertical annulus at low pressure. *Nuclear Science and Technology*, 40:493–500.
- Reyes, J. N. e Hochreiter, L. (1998). Scaling analysis for the OSU AP600 test facility (apex). *Nuclear Engineering and Design*, 186:53–109.
- Rouhani, S. Z. e Sohal, M. S. (1983). Two-phase flow patterns: a review of research results. *Progress in Nuclear Energy*, 11(3).

- Sabundjian, G., Andrade, D. A., Umbehaun, P. E., Torres, W. M., Castro, A. J. A., Conti, T. N., Massotti, P. H., Mesquita, R. N., Paladino, P. ., Filho, F. A. B., Borges, E. M., Belchior Jr., A., Rocha, R. T. V., e Damy, O. L. A. (2008). Análise teórico e experimental do fenômeno de circulação natural. In *Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamento Multifásico*, Florianópolis.
- Sabundjian, G., Andrade, D. A., Umbehaun, P. E., Torres, W. M., Macedo, L. A., Conti, T. N., Mesquita, R. N., Massotti, P. H. F., Penha, R. M. L., Silva Filho, M. F., Melo, G. R., Braz Filho, F. A., e Borges, E. M. (2009). Comparação entre dados experimentais e modelagem numérica para fenômenos de circulação natural. In *INAC - International Nuclear Atlantic Conference*, Rio de Janeiro.
- Santini, L., Papini, D., e Ricotti, M. E. (2010). Experimental characterization of a passive emergency heat removal system for a Gen III+ reactor. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2010(Article ID864709):12.
- Serizawa, A., Kataoka, I., e Michiyoshi, I. (1975). Turbulence structure of air-water bubbly flow - I. measuring techniques. *International Journal of Multiphase Flow*, 2(3):221–233.
- Sharma, M., Pilkhwal, D. S., Vijayan, P. K., Saha, D., e Sinha, R. (2010). Steady state and linear stability analysis of a super critical water natural circulation loop. *Nuclear Engineering and Design*, 240:588–597.
- Subkii, M. H., Aritomi, M., Watanabe, N., Kikura, H., e Iwamura, T. (2003). Transport mechanism of thermo-hydraulic instability in natural circulation boiling water reactors during star-up. *Nuclear Science and Technology*, 40(11):918–931.
- Taitel, Y., Barnea, D., e Duckler, A. E. (1980). Modelling flow pattern transition for steady upward gas liquid flow in vertical tubes. *AIChE Journal*, 26(3):345–354.
- Takemoto, T., Matsuzaki, M., Aritomi, M., Usui, K., Mori, M., e Yoshioka, Y. (1999). The coalescence mechanism of multiple slug bubbles. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 36(8):671–682.

- Tan, S., Su, G. H., e Gao, P. (2009). Experimental study on two-phase flow instability of natural circulation under rolling motion condition. *Annals of Nuclear Energy*, 36:103–113.
- Tanimoto, K., Ishii, M., e Lee, S. Y. (1998). Examination of transient characteristics of two-phase natural circulation within a Freon-113 boiling condensation loop. *Nuclear Engineering and Design*, 183:77–95.
- Thorncroft, G. E., Klausner, J. F., e Mei, R. (1998). An experimental investigation of bubble growth and detachment in vertical upflow and downflow boiling. 1998:2746–2760.
- Vatanakul, M., Zheng, Y., e Couturier, M. (2004). Application of ultrasonic technique in multiphase flows. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43(18):5681–5691.
- Vijayan, P. K. (2002). Experimental observations on the general trends of the steady state and stability behaviour of single-phase natural circulation loops. *Nuclear Engineering and Design*, 215(1-2):139–152.
- Vijayan, P. K. (2005). Natural circulation systems: Advantages and challenges. In *IAEA - Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants*, número TECDOC-1474.
- Vijayan, P. K. (2007). Introduction to instabilities in natural circulation systems. In *IAEA - Course on Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants*, páginas 25–29, Italy.
- Vijayan, P. K., Nayak, A. K., Bade, M. H., Kumar, N., Saha, D., e Sinha, R. K. (2000). Scaling of steady state and stability behavior of single and two-phase natural circulation systems. In *IAEA - Nuclear Power Technology Development Section*, páginas 139–150, Vienna.
- Wada, S., Kikura, H., e Aritomi, M. (2006). Pattern recognition and signal processing of ultrasonic echo signal on two-phase flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17(4):207–224.

Yun, G., Su, G. H., Wang, J. Q., Tian, W. X., Qiu, S. Z., e Jia, D. N. Zhang, J. W. (2005). Two-phase instability analysis in natural circulation loops of china advanced research reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 32:379–397.

Apêndice A

Modelos Matemáticos de Escoamentos Monofásicos e Bifásicos

A.1 Equações de Governo de Circulação Natural Monofásica

Equação de Balanço de Momento

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{l_i}{a_i} \right) \frac{dm}{dt} = \beta g \rho (T_H - T_C) L_{th} - \frac{m^2}{\rho_l a_c^2} \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{2} \left(\frac{fl}{d_h} + K \right)_i \left(\frac{a_c}{a_i} \right)^2 \right], \quad (\text{A.1})$$

Equação de Balanço de Energia

$$C_{vi} M_{sys} \frac{d(T_M - T_C)}{dt} = m C_{pi} (T_H - T_C) - q_{SG} - q_{loss} \quad (\text{A.2})$$

Equação de Velocidade do Fluido no Núcleo

$$u_{nucleo} = \left(\frac{\beta q_{co} L_{th} g}{\rho_l a_c C_{pl} \Pi_{Fl}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{A.3})$$

Equação de Parâmetro Adimensional de Resistência Hidráulica do Loop

$$\Pi_{Fl} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{2} \left(\frac{fl}{d_h} + K \right)_i \left(\frac{a_c}{a_i} \right)^2 \right] \quad (\text{A.4})$$

A.1.1 Equações de Governo de Circulação Natural Bifásica

Equação de Balanço de Momento

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{l_i}{a_i} \right) \frac{dm}{dt} = g(\rho_l - \rho_{TP})L_{th} - \frac{m^2}{\rho_l a_c^2} \left\{ \sum_{SP} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{fl}{d_h} + K \right)_i \left(\frac{a_c}{a_i} \right)^2 \right] \right. \\ \left. + \frac{\rho_l}{\rho_{TP}} \sum_{TP} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{fl}{d_h} + K \right)_i \left(\frac{a_c}{a_i} \right)^2 \right] \right\} \quad (\text{A.5})$$

Equação de Balanço de Energia

eqnarray

$$M_{sys} \frac{d(e_M - e_l)}{dt} = m(h_{TP} - h_l) - q_{SG} - q_{loss} \quad (\text{A.6})$$

Equação de Qualidade de Gás em Equilíbrio na Saída do Núcleo

$$x_e = \frac{h_{TP} - h_f}{h_{fg}} \quad (\text{A.7})$$

Equação de Densidade da Mistura Bifásica do Fluido Homogêneo

$$\rho_{TP} = \frac{\rho_f}{1 + x_e \left(\frac{\rho_f - \rho_g}{\rho_g} \right)} \quad (\text{A.8})$$

A.2 Modelos Físicos

As instalações experimentais escalonadas e similares, são dimensionadas a partir do emprego da filosofia de parâmetros similares e escalonados, deduzidos das equações conservativas. Inicialmente, apresenta-se a dedução a partir de um volume de controle, a três dimensões, conforme mostrado a seguir:

Este trabalho visa apresentar o desenvolvimento de modelagem matemática para projeto da instalação escalonada para obtenção de parâmetros de similaridades e escalas, com base no trabalho desenvolvido por Ishii e Kataoka (1984) foram as leis de escalonamento para sistema termohidráulico, de modo a permitir o dimensionamento de instalações e equipamentos de instalações experimentais escalonadas e similares. Neste trabalho de Ishii e Kataoka (1984) a adequação e utilização das equações de conservação, como ponto de partida para as deduções das demais equações.

Equação da Continuidade:

$$u_i = \frac{a_o}{a_i} u_r \quad (\text{A.9})$$

Equação de Momento:

$$\rho \frac{du_r}{dt} \sum_i \frac{a_o}{a_i} l_i = \beta g \rho \Delta T l_h - \frac{\rho u_r^2}{2} \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \left(\frac{a_o}{a_i} \right)^2 \quad (\text{A.10})$$

Equação de Energia do Fluido:

$$\rho C_p \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right\} = \frac{4h}{d} (T_s - T) \quad (\text{A.11})$$

Equação de Energia do Sólido:

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} + K_s \nabla^2 T_s - q_s = 0 \quad (\text{A.12})$$

Condições de Contorno entre Fluido e Sólido:

$$-K_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = h(T_s - T) \quad (\text{A.13})$$

O trabalho inicia pela equação integral de momento, continua com a equação de energia do fluido e do sólido, prossegue com parâmetros adimensionais, adicionais e de similaridades, envolvendo sistemas monofásico e bifásico. Estas equações são os elementos essenciais, tanto para o projeto físico da instalação e, conseqüentemente, para retratar uma condição ao sistema de remoção de calor residual.

A.2.1 Sistema Monofásico

Equação Integral de Momento

$$\rho \frac{du_r}{dt} \sum_i \frac{a_o}{a_i} l_i = \beta g \rho \Delta T l_h - \frac{\rho u_r^2}{2} \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \left(\frac{a_o}{a_i} \right)^2 \quad (\text{A.14})$$

$$\frac{du_r}{dt} \sum_i \frac{a_o}{a_i} l_i = \beta g \Delta T l_h - \frac{u_r^2}{2} \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \left(\frac{a_o}{a_i} \right)^2 \quad (\text{A.15})$$

$$U_r = \frac{u_r}{u_o} \quad (\text{A.16})$$

donde,

$$u_r = U_r u_o \quad (\text{A.17})$$

$$\frac{dU_r u_o}{dt} \sum_i \frac{1}{A_i} l_i = \beta g \Delta T l_h - \frac{(U_r u_o)^2}{2} \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \left(\frac{a_o}{a_i} \right)^2 \quad (\text{A.18})$$

$$u_i = \frac{a_o}{a_i} u_r \quad (\text{A.19})$$

$$\frac{a_o}{a_i} = \frac{u_i}{u_r} = \frac{u_i}{U_r u_o} \quad (\text{A.20})$$

$$\frac{a_o}{a_i} = \frac{u_i}{U_r u_o} \quad (\text{A.21})$$

$$\frac{dU_r u_o}{dt} \sum_i \frac{1}{A_i} l_i = \beta g \Delta T l_h - \frac{(U_r u_o)^2}{2} \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \left(\frac{u_i}{U_r u_o} \right)^2 \quad (\text{A.22})$$

$$\frac{dU_r u_o}{dt} \sum_i \frac{1}{A_i} l_i = \beta g \Delta T l_h - \frac{(U_r u_o)^2}{2} \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \frac{(u_i)^2}{(U_r u_o)^2} \quad (\text{A.23})$$

$$\frac{dU_r u_o}{dt} \sum_i \frac{1}{A_i} l_i = \beta g \Delta T l_h - \frac{1}{2} \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i u_i^2 \quad (\text{A.24})$$

$$\frac{dU_r}{dt} \sum_i \frac{1}{A_i} l_i = \frac{\beta g \Delta T l_h}{u_o} - \frac{1}{2u_o} \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i u_i^2 \quad (\text{A.25})$$

$$\frac{dU_r}{dt} \sum_i \frac{1}{A_i} l_i = \frac{\beta g \Delta T l_h}{u_o} - \frac{1}{2u_o} \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \left(\frac{U_r u_o a_o}{a_i} \right)^2 \quad (\text{A.26})$$

$$\frac{dU_r}{dt} \sum_i \frac{1}{A_i} l_i = \frac{\beta g \Delta T l_h}{u_o} - \frac{1}{2u_o} U_r^2 u_o^2 \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \left(\frac{a_o}{a_i} \right)^2 \quad (\text{A.27})$$

$$A_i = \frac{a_o}{a_i} \quad (\text{A.28})$$

$$\frac{1}{A_i} = \frac{a_i}{a_o} \quad (\text{A.29})$$

$$\frac{dU_r}{dt} \sum_i \frac{1}{A_i} l_i = \frac{\beta g \Delta T l_h}{u_o} - \frac{1}{2u_o} U_r^2 u_o^2 \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \left(\frac{1}{A_i} \right)^2 \quad (\text{A.30})$$

$$\frac{dU_r}{dt} \sum_i \frac{1}{A_i} l_i = \frac{\beta g \Delta T l_h}{u_o} - \frac{1}{2} U_r^2 u_o \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \left(\frac{1}{A_i} \right)^2 \quad (\text{A.31})$$

$$\tau = \frac{t}{t_o} \quad (\text{A.32})$$

$$l_o = u_o t_o \quad (\text{A.33})$$

$$t_o = \frac{l_o}{t_o} \quad (\text{A.34})$$

$$t = \tau \frac{l_o}{u_o} \quad (\text{A.35})$$

$$\frac{dU_r}{d\tau \frac{l_o}{u_o}} \sum_i \frac{1}{A_i} l_i = \frac{\beta g \Delta T l_h}{u_o} - \frac{1}{2} U_r^2 u_o \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \left(\frac{1}{A_i} \right)^2 \quad (\text{A.36})$$

$$\frac{u_o}{l_o} \frac{dU_r}{d\tau} \sum_i \frac{1}{A_i} l_i = \frac{\beta g \Delta T l_h}{u_o} - \frac{1}{2} U_r^2 u_0 \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \left(\frac{1}{A_i} \right)^2 \quad (\text{A.37})$$

$$\frac{dU_r}{d\tau} \sum_i \frac{1}{A_i} \frac{l_i}{l_o} = \frac{\beta g \Delta T l_h}{u_o^2} - \frac{1}{2} U_r^2 \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \left(\frac{1}{A_i} \right)^2 \quad (\text{A.38})$$

$$\frac{dU_r}{d\tau} \sum_i \frac{1}{A_i} L_i = \frac{\beta g \Delta T l_h}{u_o^2} - \frac{1}{2} U_r^2 \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \left(\frac{1}{A_i} \right)^2 \quad (\text{A.39})$$

$$\Theta = \frac{\Delta T}{\Delta T_o} \quad (\text{A.40})$$

$$\Delta T = \theta \Delta T_o \quad (\text{A.41})$$

$$\frac{dU_r}{d\tau} \sum_i \frac{1}{A_i} L_i = \frac{\beta g \Delta T_o l_o}{u_o^2} \theta L_h - \frac{1}{2} U_r^2 \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \left(\frac{1}{A_i} \right)^2 \quad (\text{A.42})$$

$$\frac{dU_r}{d\tau} \sum_i \frac{1}{A_i} L_i = \frac{\beta g \Delta T_o l_o}{u_o^2} (\theta_h - \theta_c) L_h - \frac{1}{2} U_r^2 \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \left(\frac{1}{A_i} \right)^2 \quad (\text{A.43})$$

$$Ri = \frac{\beta g \Delta T_o l_o}{u_o^2} \quad (\text{A.44})$$

$$F_i = \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \quad (\text{A.45})$$

$$\frac{dU_r}{d\tau} \sum_i \frac{L_i}{A_i} = Ri (\theta_h - \theta_c) L_h - \frac{1}{2} U_r^2 \sum_i F_i \left(\frac{1}{A_i} \right)^2 \quad (\text{A.46})$$

Equação de Energia do Fluido

$$\rho C_p \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right\} = \frac{4h}{d} (T_s - T) \quad (\text{A.47})$$

$$\left\{ \frac{\partial \Gamma}{\partial t} + u \frac{\partial \Gamma}{\partial z} \right\} = \frac{4h}{\rho C_p d} (T_s - T) \quad (\text{A.48})$$

$$t = \tau \frac{l_o}{u_o} \quad (\text{A.49})$$

$$\left\{ \frac{\partial \Gamma}{\partial \tau \frac{l_o}{u_o}} + u \frac{\partial \Gamma}{\partial z} \right\} = \frac{4h}{\rho C_p d} (T_s - T) \quad (\text{A.50})$$

$$\left\{ \frac{u_o}{l_o} \frac{\partial \Gamma}{\partial \tau} + u \frac{\partial \Gamma}{\partial z} \right\} = \frac{4h}{\rho C_p d} (T_s - T) \quad (\text{A.51})$$

$$u = u_i \quad (\text{A.52})$$

$$t = \theta_i \quad (\text{A.53})$$

$$t_s = \theta_{si} \quad (\text{A.54})$$

$$Z = \frac{z}{l_o} \quad (\text{A.55})$$

$$U_r u_o \frac{a_o}{a_i} = u_i \quad (\text{A.56})$$

$$\left\{ \frac{u_o}{l_o} \frac{\partial \Gamma}{\partial \tau} + U_r u_o \frac{a_o}{a_i} \rho \frac{\partial \Gamma}{\partial Z l_o} \right\} = \frac{4h}{\rho C_p d} (T_s - T) \quad (\text{A.57})$$

$$\frac{u_o}{l_o} \left\{ \frac{\partial \Gamma}{\partial \tau} + U_r \frac{a_o}{a_i} \rho \frac{\partial \Gamma}{\partial Z} \right\} = \frac{4h}{\rho C_p d} (T_s - T) \quad (\text{A.58})$$

$$\frac{u_o}{l_o} \left\{ \frac{\partial \Gamma}{\partial \tau} + \frac{U_r}{A_i} \rho \frac{\partial \Gamma}{\partial Z} \right\} = \frac{4h}{\rho C_p d} (T_s - T) \quad (\text{A.59})$$

$$\left\{ \frac{\partial \Gamma}{\partial \tau} + \frac{U_r}{A_i} \rho \frac{\partial \Gamma}{\partial Z} \right\} = \frac{l_o}{u_o} \frac{4h}{\rho C_p d} (T_s - T) \quad (\text{A.60})$$

$$\left\{ \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{U_r}{A_i} \rho \frac{\partial T}{\partial Z} \right\} = \frac{4hl_o}{\rho C_p du_o} (T_s - T) \quad (\text{A.61})$$

$$St_i = \frac{4hl_o}{\rho C_p du_o} \quad (\text{A.62})$$

$$\left\{ \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{U_r}{A_i} \rho \frac{\partial T}{\partial Z} \right\} = St_i (T_s - T) \quad (\text{A.63})$$

Equação de Energia no Sólido

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} + K_s \nabla^2 T_s - q_s = 0 \quad (\text{A.64})$$

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} + K_s \frac{\nabla^{*2}}{\delta^2} T_s - q_s = 0 \quad (\text{A.65})$$

$$\frac{u_o}{l_o} \rho_s C_{ps} \frac{\partial \theta_{si}}{\partial \tau} + K_s \frac{\nabla^{*2}}{\delta^2} \theta_{si} - q_s = 0 \quad (\text{A.66})$$

$$\frac{\partial \theta_{si}}{\partial \tau} + \frac{l_o}{u_o} \frac{K_s}{\rho_s C_{ps}} \frac{\nabla^{*2}}{\delta^2} \theta_{si} - q_s = 0 \quad (\text{A.67})$$

$$\alpha_s = \frac{K_s}{\rho_s C_{ps}} \quad (\text{A.68})$$

A.2.2 Parâmetros Adimensionais Monofásicos

Na instalação CCN, pode-se citar o trabalho de Botelho (1992) e Botelho (1993), que estudou sistemas passivos de remoção de calor residual em PWR de Baixa Energia, utilizando os conceitos definidos por Ishii e Kataoka (1984), obtendo dados importantes para aplicações em modelos apropriados, envolvendo as relações de escalas para as diversas variáveis do processo, de modo a permitir o adequado conhecimento do comportamento da circulação natural, através de experimentos e simulações no Laboratório de Termo-Hidráulica Experimental.

Número de Richardson

Razão entre a força gravitacional e de inércia, além de proporcionar a identificação da influência da densidade na estabilidade do fluido.

$$Ri = \frac{g\Delta T\Delta L}{U^2} \quad (\text{A.69})$$

Número de Fricção

Razão entre a força de atrito e de inércia, além de proporcionar a representação da perda de pressão.

$$F = \left[\left(\frac{f_L}{d_H} \right) + K \right] \quad (\text{A.70})$$

Número de Stanton

Razão entre a força gravitacional e de inércia, além de proporcionar a identificação da influência da densidade na estabilidade do fluido.

$$St = \frac{4h_F L_C}{\rho_F C_F U d_H} \quad (\text{A.71})$$

Número de Razão de Tempo

Razão entre tempo de escoamento do fluido e tempo de condução de calor.

$$t^* = \frac{L_C}{\frac{U}{\alpha_S^2}} \quad (\text{A.72})$$

Número de Biot

Razão de transferências de quantidade de calor ao fluido pela quantidade de calor de condução pelo sólido.

$$Bi = \frac{h_F \delta}{K_S} \quad (\text{A.73})$$

Número de Fonte de Calor

Razão de geração de calor no sólido pela quantidade de calor de convecção pelo sólido.

$$Q_S = \frac{q_c L_c}{\rho_s C_{ps} U \Delta T} \quad (\text{A.74})$$

A.2.3 Parâmetros Adicionais

Escala de Escoamento

Razão entre as seções transversais frias e aquecidas do circuito hidráulico.

$$A = \frac{a_f}{a_q} \quad (\text{A.75})$$

Escala de Comprimento

Razão entre os comprimentos dos circuitos frios e aquecidos.

$$L = \frac{L_f}{L_q} \quad (\text{A.76})$$

A.2.4 Sistema Bifásico

Equação de Conservação de Massa

- Para escoamento bifásico temos para a massa total, uma parcela de massa de líquido e uma parcela de massa de vapor:

$$m = m_V + m_L, \quad (\text{A.77})$$

$$m = \rho V, \quad (\text{A.78})$$

$$\rho V = m_V + m_L, \quad (\text{A.79})$$

$$m_V = \rho_V V_V, \quad (\text{A.80})$$

$$m_L = \rho_L V_L, \quad (\text{A.81})$$

$$V = V_V + V_L, \quad (\text{A.82})$$

$$\rho V = \rho_V V_V + \rho_L V_L, \quad (\text{A.83})$$

$$\rho(V_V + V_L) = \rho_V V_V + \rho_L V_L, \quad (\text{A.84})$$

$$\rho = \frac{\rho_V V_V + \rho_L V_L}{V_V + V_L} = \frac{\rho_V V_V}{V_V + V_L} + \frac{\rho_L V_L}{V_V + V_L}. \quad (\text{A.85})$$

- ρ_V e ρ_L são valores de estados termodinâmicos que dependem de α_v e α_L ,

$$\alpha_V = \frac{V_V}{V_V + V_L}, \quad (\text{A.86})$$

$$\alpha_L = \frac{V_L}{V_V + V_L}, \quad (\text{A.87})$$

$$\rho = \rho_V \alpha_V + \rho_L \alpha_L, \quad (\text{A.88})$$

$$\alpha_V + \alpha_L = 1, \quad (\text{A.89})$$

$$\alpha_V = \alpha, \quad (\text{A.90})$$

$$\alpha_L = 1 - \alpha_V = 1 - \alpha, \quad (\text{A.91})$$

$$\rho = \rho_V \alpha + \rho_L (1 - \alpha) \quad (\text{A.92})$$

- Rearranjando a equação A.93, tem-se

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_{AZ} \rho dA_Z + \frac{\partial}{\partial z} \iint_{AZ} \rho V_Z dA_Z = 0 \quad (\text{A.93})$$

tem-se,

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_{AZ} [\rho_V \alpha + \alpha_L (1 - \alpha)] dA_Z + \frac{\partial}{\partial z} \iint_{AZ} [\rho_V \alpha + \alpha_L (1 - \alpha)] V_Z dA_Z = 0, \quad (\text{A.94})$$

$$V_Z = V_V + V_L, \quad (\text{A.95})$$

$$m_V = \rho_V V_V \alpha_V, \quad (\text{A.96})$$

$$m_L = \rho_L V_L \alpha_L, \quad (\text{A.97})$$

$$m = \rho V_Z, \quad (\text{A.98})$$

$$m = \rho V [\alpha + (1 - \alpha)] = \rho_V V_V \alpha_V + \rho_L V_L \alpha_L = \rho_V V_V \alpha_V + \rho_L V_L (1 - \alpha_V), \quad (\text{A.99})$$

$$m = \rho_V V_V \alpha + \rho_L V_L (1 - \alpha) \quad (\text{A.100})$$

- A equação A.94 ,pode ser escrita também de outra forma,

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_{AZ} [\rho_V \alpha + \alpha_L (1 - \alpha)] dA_Z + \frac{\partial}{\partial z} \iint_{AZ} [\rho_V \alpha V_{VZ}] + [\alpha_L (1 - \alpha)] V_{LZ} dA_Z = 0. \quad (\text{A.101})$$

- Integrando-se, tem-se

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_{AZ} [\rho_V \alpha + \alpha_L (1 - \alpha)] A_Z + \frac{\partial}{\partial z} \iint_{AZ} [\rho_V \alpha V_{VZ}] + [\alpha_L (1 - \alpha)] V_{LZ} A_Z = 0 \quad (\text{A.102})$$

- A densidade média da mistura ou densidade estática da mistura,

$$X_{ST} = \frac{m_V}{m_V + m_L} = \frac{\rho_V \alpha}{\rho_V \alpha + \rho_L (1 - \alpha)}, \quad (\text{A.103})$$

- A densidade média de fase,

$$\rho_{mV} = \rho X_{ST}, \quad (\text{A.104})$$

$$\rho_{mV} = \frac{\rho X_{ST}}{\alpha}, \quad (\text{A.105})$$

$$\rho_{mV}\alpha = \rho X_{ST}, \quad (\text{A.106})$$

$$\rho_{mL} = (1 - X_{ST})\rho, \quad (\text{A.107})$$

$$\rho_L(1 - \alpha) = (1 - X_{ST})\rho, \quad (\text{A.108})$$

$$\rho_L = \frac{(1 - X_{ST})\rho}{(1 - \alpha)} \quad (\text{A.109})$$

- A densidade média da mistura ou densidade estática da mistura,

$$\rho_m = \rho_{mV} + \rho_{mL}, \quad (\text{A.110})$$

$$\rho_m = \rho_V\alpha + (1 - \alpha)\rho_L \quad (\text{A.111})$$

- A taxa média de escoamento,

$$G_{mZ} = \frac{m_Z^\bullet}{A_Z} = \frac{m_{VZ}^\bullet + m_{LZ}^\bullet}{A_Z} = \frac{m_{VZ}^\bullet}{A_Z} + \frac{m_{LZ}^\bullet}{A_Z} \quad (\text{A.112})$$

- Rearranjando, tem-se

$$G_{mZ} = G_{VZ} + G_{LZ}, \quad (\text{A.113})$$

$$G_Z = \frac{\rho V_Z \alpha}{A_Z} A_Z = \rho V_Z \alpha, \quad (\text{A.114})$$

$$G_{VZ} = \rho_V V_V \alpha_V, \quad (\text{A.115})$$

$$G_{LZ} = \rho_L V_L (1 - \alpha_V) = \rho_L V_L (1 - \alpha), \quad (\text{A.116})$$

$$G_m = \rho_V V_V \alpha_V + \rho_L V_L (1 - \alpha_V), \quad (\text{A.117})$$

$$G_m = \rho_V V_V \alpha + \rho_L V_L (1 - \alpha) \quad (\text{A.118})$$

- Podemos reescrever a equação A.22 como,

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho_m A_Z + \frac{\partial}{\partial z}G_m A_Z = 0 \quad (\text{A.119})$$

ou, desconsiderando-se a direção do eixo Z,

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho_m + \frac{\partial}{\partial z}G_m = 0 \quad (\text{A.120})$$

A.2.5 Equação de Quantidade de Movimento

Usando as equações A.121 e A.122

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_{AZ} \rho v_z dA_Z + \frac{\partial}{\partial z} \iint_{AZ} \rho v_z^2 dA_Z = 0 \quad (\text{A.121})$$

$$u_i = \frac{a_o}{a_i} u_r \quad (\text{A.122})$$

tem-se,

$$\rho = \rho_V \alpha_V + \rho_L \alpha_L ,$$

$$\rho = \rho_V \alpha + \rho_L (1 - \alpha) .$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [[\rho \alpha v_{VZ} + \rho_L (1 - \alpha) v_{LZ}] A_Z] + \frac{\partial}{\partial z} [[\rho_V \alpha v_{VZ}^2 + \rho_L (1 - \alpha) v_{LZ}^2] A_Z] = \\ - \frac{\partial}{\partial z} p A_Z + \int_{PZ} \tau_w dP_Z + [\rho_V \alpha + \rho_L (1 - \alpha)] g \cos \theta A_Z . \end{aligned} \quad (\text{A.123})$$

- Considerando-se densidade dinâmica e fluxo mássico médio, tem-se

$$\frac{1}{\rho_m^+} = \frac{1}{G_m^2} [\rho_V \alpha v_{VZ}^2 + \rho_L (1 - \alpha) v_{LZ}^2] \quad (\text{A.124})$$

$$\frac{G_m^2}{\rho_m^+} = [\rho_V \alpha v_{VZ}^2 + \rho_L (1 - \alpha) v_{LZ}^2] \quad (\text{A.125})$$

$$G_m = [\rho_V \alpha v_{VZ} + \rho_L (1 - \alpha) v_{LZ}] \quad (\text{A.126})$$

$$\rho_m = \rho_V \alpha + \rho_L (1 - \alpha) \quad (\text{A.127})$$

- Podemos reescrever a equação A.57 , como,

$$\frac{\partial}{\partial t}(G_m A_z) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{G_m^2}{\rho_m^+} A_z\right) = -\frac{\partial}{\partial z} p A_z - \int_{PZ} \tau_w dP_Z - \rho_m g \cos \theta A_z \quad (\text{A.128})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} G_m + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{G_m^2}{\rho_m^+}\right) = -\frac{\partial}{\partial z} p_m - \sum F_w - \rho_m g \cos \theta \quad (\text{A.129})$$

$$\langle \rho_m \rangle = \rho_m^+ \quad (\text{A.130})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} G_m + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{G_m^2}{\langle \rho_m \rangle}\right) = -\frac{\partial}{\partial z} p_m - \sum F_w - \rho_m g \cos \theta \quad (\text{A.131})$$

Equação de Conservação de Energia

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho_m h_m - \frac{\partial}{\partial t} p_m + \frac{\partial}{\partial z} [\rho_V h_V v_V \alpha + \rho_L h_L v_L (1 - \alpha)] = \\ = \sum_{i=1}^N q_i'' \frac{P_i}{A_i} + \frac{G_m}{\rho_m} \sum_{i=1}^N F_{wi} + \frac{G_m}{\rho_m} \frac{\partial p_m}{\partial z}. \end{aligned} \quad (\text{A.132})$$

$$p_m = p_V \alpha + p_L (1 - \alpha) \quad (\text{A.133})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} G_m + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{G_m^2}{\langle \rho_m \rangle}\right) = -\frac{\partial}{\partial z} p_m - \sum_{i=1}^N F_w - \rho_m g \cos \theta. \quad (\text{A.134})$$

$$\frac{DV}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + v_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_j} = \alpha \nabla^2 T. \quad (\text{A.135})$$

A.2.6 Parâmetros de Similaridade

Número de Mudança de Fase

Razão entre energia resultante da mudança de fase e transferência de calor ao sistema.

$$N_{mf} = \left(\frac{4q_q \delta L_q}{d_H U_q \rho_F \Delta h_{FG}} \right) \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_G} \right). \quad (\text{A.136})$$

Número de Sub-Resfriamento

Razão entre os efeitos do fluido monofásico e devido ao sub-resfriamento e entrada de líquido.

$$N_{Sub} = \left(\frac{\Delta h_{Sub}}{\Delta h_{FG}} \right) \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_G} \right). \quad (\text{A.137})$$

Número de Froude

Razão entre a força de inércia do líquido e a força gravitacional do vapor.

$$N_{Fr} = \left(\frac{U_q^2}{g L_q} \right) \left(\frac{\rho_F}{\alpha_q \Delta \rho} \right). \quad (\text{A.138})$$

Número de Drift-Flux

$$N_D = \frac{V_G}{U_q}. \quad (\text{A.139})$$

Número de Razão de Tempo

$$t^* = \frac{L_C/U}{\delta^2/\alpha_S^2}. \quad (\text{A.140})$$

Razão de Inércia Térmica

$$N_T = \frac{\rho_S C_S \delta}{\rho_F C_F U d_H}. \quad (\text{A.141})$$

Número de Fricção

$$N_F = \left(\frac{fL}{d_H}\right) \left[\frac{1 + x \frac{\Delta\rho}{\rho_G}}{(1 + x \frac{\Delta\mu}{\rho_G})^{0.25}}\right] \left(\frac{a_q}{a_f}\right). \quad (\text{A.142})$$

Número de Orifício

$$N_O = K \left[1 + x^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_G}\right)\right] \left(\frac{a_q}{a_f}\right)^2 \quad (\text{A.143})$$

A.2.7 Equação de Navier-Stokes

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -gradp + \mu \nabla^2 V + \rho g \quad (\text{A.144})$$

A.2.8 Equação de Acoplamento

Para promover o adequado acoplamento entre as equações, levando-se em conta que na circulação natural tem-se movimento provocado por diferenças de temperatura e estas diferenças de temperatura promovem mudança de fase e, consequente-

mente mudança de densidade, utiliza-se a Aproximação de Boussinesq para modificação destas equações, que consiste de um coeficiente de dilatação volumétrica (β) obtido por adimensionalização, além de introdução de valores de referencia para densidade (ρ_0) e temperatura (T_0), acoplado adequadamente, conforme mostrado nas equações A.145 e A.146.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho dx dA_X + \frac{\partial}{\partial t} \rho dy dA_Y + \frac{\partial}{\partial t} \rho dz dA_Z = & \rho V_X dy dz + \rho V_Y dx dz + \rho V_Z dx dy - \\ & - \rho V_X dy dz - \rho V_Y dx dz - \rho V_Z dx dy - \frac{\partial}{\partial x} \rho V_X dx dy dz - \frac{\partial}{\partial y} \rho V_Y dy dx dz - \\ & - \frac{\partial}{\partial z} \rho V_Z dz dx dy = \end{aligned} \quad (\text{A.145})$$

- Executando as operações de soma e diferença, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho dx dA_X + \frac{\partial}{\partial t} \rho dy dA_Y + \frac{\partial}{\partial t} \rho dz dA_Z = & - \frac{\partial}{\partial x} \rho V_X dx dy dz - \frac{\partial}{\partial y} \rho V_Y dy dx dz - \\ & - \frac{\partial}{\partial z} \rho V_Z dz dx dy = \end{aligned} \quad (\text{A.146})$$

tem-se,

$$\beta = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial T}, \quad (\text{A.147})$$

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (\text{A.148})$$

A.2.9 Equações de Modelagem

Para obtenção das equações finais de modelagem, considera-se que na equação da conservação de massa a variação de densidade não ocorre em função do tempo e sim em função da temperatura, portanto:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (\text{A.149})$$

Outra consideração importante é admitir que a soma das vazões de entrada e saída no volume de controle seja nulo.

$$\text{div}V = 0 \quad (\text{A.150})$$

A equação de Navier-Stokes sofre também uma modificação com a substituição dos valores das equações de acoplamento, com base na Aproximação de Boussinesq, na parcela referente à densidade (ρ), passando a equação ter a seguinte forma:

$$\rho_o \frac{DV}{Dt} = -\text{grad}p + \mu \nabla^2 V + \rho_o [1 - \beta(T - T_o)] g \quad (\text{A.151})$$

A equação da energia, na forma da derivada substancial da temperatura, passa a ter a seguinte forma, contendo a difusividade térmica

(ρ), onde tem-se de forma implícita a condutividade térmica (k), a densidade (ρ) e o calor específico (C_p):

$$\frac{DV}{Dt} = \alpha \nabla^2 T, \quad (\text{A.152})$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{A.153})$$

Deste modo, na análise do problema de circulação natural, utiliza-se como base para o modelo final as equações A.154, A.155 e A.156.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho dy dA_Y = -\frac{\partial}{\partial y} \rho V_Y dy dx dz = \frac{\partial}{\partial t} \rho dy dA_Y + \frac{\partial}{\partial y} \rho V_Y dy dA_Y = 0, \quad (\text{A.154})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho dz dA_Z = -\frac{\partial}{\partial z} \rho V_Z dz dx dy = \frac{\partial}{\partial t} \rho dz dA_Z + \frac{\partial}{\partial z} \rho V_Z dz dA_Z = 0. \quad (\text{A.155})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho dz dA_Z + \frac{\partial}{\partial z} \rho V_Z dz dA_Z = 0. \quad (\text{A.156})$$

A.2.10 Grupos Adimensionais

Pela adimensionalização da equação A.156, encontramos uma expressão correspondente a um grupo adimensional, relacionando velocidade média no escoamento (U_0), o diâmetro (d) da tubulação onde se desenvolve o escoamento e a viscosidade cinemática (ν). A equação pode ser reescrita na seguinte forma:

$$\frac{DT^*}{Dt} = \frac{\alpha}{U_0 d} \nabla^2 T^* = \frac{1}{P_e} \nabla^2 T^* \quad (\text{A.157})$$

Onde P_e denomina – *senmerodePcletecorresponde* :

$$P_e = \frac{U_0 d \nu}{\alpha} = Re P_r \quad (\text{A.158})$$

Sendo Pr o número de Prandtl e corresponde a:

$$P_r = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{A.159})$$

Sendo Re o número de Reynolds e corresponde a:

$$Re = \frac{U_0 d}{\nu} \quad (\text{A.160})$$

A.2.11 Grupos Adimensionais Acoplados

Na resolução da modelagem de circulação natural podem ser utilizados outros grupos adimensionais derivados de interações entre elementos das equações constitutivas básicas e as correlações, entre os quais podem ser citados os aplicáveis no processo.

Número de Brinkman:

$$B_r = \frac{\mu U}{q_0 H} \quad (\text{A.161})$$

Número de Grashof:

$$G_r = \frac{\beta g \Delta T d^3}{\nu^2} \quad (\text{A.162})$$

Número de Rayleigh:

$$R_a = \frac{\beta g \Delta T d^3}{\nu \alpha} \quad (\text{A.163})$$

Número de Marangoni:

$$M_a = \frac{\Delta T d \sigma}{\nu \alpha} \quad (\text{A.164})$$

Número de Bond:

$$B_o = \frac{\rho g d^2}{\sigma} \quad (\text{A.165})$$

Número de Nusselt:

$$N_u = \frac{hd}{k} \quad (\text{A.166})$$

Número de Jacob:

$$J_a = \frac{C_p \Delta T}{h} \quad (\text{A.167})$$